



**Escola de Camins**

Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports  
UPC BARCELONATECH

# Sensibilidad del ensayo Fénix sobre mezclas densas. Efectos del tamaño máximo de árido y altura de probeta

Treball realitzat per:

**Enric Avellaneda Coldeforn**

Dirigit per:

**Adriana Martínez Reguero**

Grau en:

**Ingeniería de Obras Públicas**

Barcelona, 01/2019

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental

**TREBALL FINAL DE GRAU**



## AGRADECIMIENTOS

Hoy es el día, después de todos estos años, hoy es el día en el que pongo la guinda a la carrera, finalizando mi trabajo final de grado. Han sido unos años duros e intensos, pero me llevo un gran crecimiento no solo a nivel académico sino también a nivel personal. La realización de este trabajo, tanto la parte experimental como la técnica, han requerido un trabajo que sin las personas que me han brindado su ayuda y apoyo no habría sido posible realizar. Por tal motivo me gustaría agradecerles su compañía a lo largo de mi vida universitaria y de la realización de esta tesis.

Primero de todo, me gustaría agradecer a la profesora Adriana Martínez Reguero su incuestionable ayuda y dedicación. Has estado en todo momento que he necesitado, aportando mucha cercanía y pasión por lo que enseñas. De verdad, solo deseo que todos puedan tener una profesora como tu algún día.

Además, me gustaría dar las gracias a José Amorós y a Jordi, técnicos del Laboratorio de Caminos de la Universidad Politécnica de Cataluña. Gracias a vosotros ha sido posible este trabajo, con vuestra ayuda y vuestros conocimientos, además del buen ambiente que creáis, ha sido todo mucho más fácil.

También me gustaría agradecer a mis amigos de la universidad su amistad. Gracias a vosotros este recorrido ha sido mucho mejor e inolvidable.

Finalmente, mi familia. A mi padre y a mi madre, apoyándome en todo momento, y sobre todo a mi hermana Mariona, pilar fundamental en mi vida. A los tres, gracias por estar conmigo.





## RESUMEN

**Título:** Sensibilidad del ensayo Fénix sobre mezclas densas. Efecto del tamaño máximo de árido y altura de la probeta

**Autor:** Enric Avellaneda Colldeforn

**Tutora:** Adriana Martínez Reguero

El elemento básico de las infraestructuras de transporte son las carreteras, cuyos firmes están compuestos por varias capas, aportando desde estabilidad estructural hasta confortabilidad para los usuarios. Estas capas, especialmente la de rodadura por ser la más superficial, están expuestas continuamente a altas sollicitaciones provocadas por el tráfico y los efectos medioambientales. Estos esfuerzos tan elevados pueden propiciar la aparición de fracturas, incrementando el coste económico de mantenimiento y reparación de los firmes. Dichos efectos exigen un estudio de la fractura provocada para así poder garantizar la calidad requerida.

En la presente tesis, hemos dedicado a estudiar la sensibilidad de uno de estos estudios experimentales, denominado ensayo Fénix. Es un ensayo a tracción relativamente nuevo, desarrollado por el Laboratorio de Caminos de la Universidad de Cataluña (UPC), que se define como un ensayo a tracción capaz de evaluar el proceso de fisuración producido sobre muestras asfálticas.

El nombre del ensayo viene dado por el momento de su desarrollo, el cual fue dentro de un proyecto de investigación que se llamaba Fénix: investigación estratégica en carreteras más seguras y sostenibles.

Estudiaremos la sensibilidad que posee este estudio frente a la variación de ciertos parámetros característicos de las muestras, como serán la diferencia del tamaño máximo de árido y la diferencia de altura de la probeta. La realización de dichos estudios será llevada a cabo a dos temperaturas distintas, permitiendo observar la influencia que tienen en el resultado final.

Para completar el estudio, una vez realizado el ensayo Fénix, lo complementaremos con la aplicación de test estadísticos para así determinar la repetibilidad entre probetas. Nos centraremos en cuatro propiedades de las muestras: el porcentaje de huecos, el índice de resistencia a tracción, la energía de fractura y el desplazamiento al 50% de la carga máxima.

Al término del trabajo encontramos la conclusión. Se ha podido observar cómo las variables estudiadas, en la mayoría de los casos, no afectan a los parámetros Fénix (IRT, GF y ductilidad), diferenciando cada muestra con sus características geométricas y de dimensionamiento particulares.



## ABSTRACT

**Title:** Fénix's sensibility test about dense mixtures. Effect of maximum aggregate size and specimen height.

**Author:** Enric Avellaneda Colldeforn

**Tutora:** Adriana Martínez Reguero

The basic element of transport infrastructures are the roads, composed by several layers, providing both structural stability and comfort for the users. These layers, especially the rolling because it is the most superficial one, are continuously exposed to heavy loads caused by traffic and environmental effects. These big efforts can cause the appearance of fractures, increasing the economic cost of maintenance and repair of the pavements. These effects require a study of the fracture caused in order to guarantee the required quality.

In the present thesis, we have focused on the study of the sensitivity of one of these experimental studies, called the Fénix test. It is a relatively new tensile test, developed by the Road Laboratory of the Polytechnical University of Catalonia (UPC), which is defined as a tensile test capable of evaluating the cracking process produced on asphalt samples.

The name of the test is given by the time of its development, which was included in a research project called Fénix: strategic research on safer and more sustainable roads.

We will study the sensitivity of this study against the variation of certain characteristic parameters of the samples, such as the difference between the maximum aggregate size and the difference in height of the specimen. These studies will be carried out at two different temperatures, thus allowing to observe the influence they have on the final result.

To complete the study, once the Fénix test is done, we will complement it with the application of statistical tests to determine the repeatability between test tubes. We will focus on four properties of the samples: the percentage of holes, the tensile strength index, the fracture energy and the 50% displacement of the maximum load.

At the end of the work we will find the conclusion about the effectiveness of the Fénix test and its sensitivity, where we will see that it is an optimal study to define the behavior of bituminous mixtures and their properties, distinguishing each sample with its particular characteristics.



# ÍNDICE

<b>CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
1.1 Introducción.....	1
1.2 Objetivos del trabajo.....	2
1.3 Descripción de los capítulos.....	3
 <b>CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE.....</b>	 <b>4</b>
2.1 Introducción.....	4
2.2 Generalidades.....	4
2.3 Mezclas bituminosas.....	5
2.3.1 Definición.....	5
2.3.2 Clasificación y nomenclatura de las mezclas.....	5
2.3.3 Composición mezclas AC.....	7
2.3.3.1 Áridos.....	7
2.3.3.2 Ligante.....	8
2.3.4 Propiedades.....	8
2.4 Fisuración.....	9
2.4.1 Fisuración transversal.....	9
2.4.2 Fisuración longitudinal.....	10
2.4.3 Fisuración por fatiga.....	10
2.4.4 Fisuración de borde.....	11
2.4.5 Fisuración en bloque.....	12
2.4.6 Fisuración por reflexión de juntas.....	12
2.5 Ensayos de tracción.....	13
2.5.1 Indirect Tensile Test (IDT).....	13
2.5.2 Semi-circular Bending Test (SCB).....	15
2.5.3 Disk-Shaped Compact Tension Test (DCT).....	16
2.5.4 Ensayo Cataluña Tracción Directa (CTD).....	17
2.5.5 Ensayo Barcelona Tracción Directa (BTD).....	17
2.5.6 Ensayo Fénix.....	19
 <b>CAPÍTULO 3. ESTUDIO EXPERIMENTAL.....</b>	 <b>21</b>
3.1 Introducción.....	21
3.2 Plan de trabajo.....	21
3.3 Materiales empleados.....	22
3.3.1 Áridos.....	22
3.3.2 Filler.....	24
3.3.3 Betún.....	24
3.4 Granulometría.....	25
3.5 Fabricación.....	27
3.5.1 Tamizado de los áridos gruesos y finos.....	27
3.5.2 Preparación de los áridos.....	29

3.5.3 Fabricación de la mezcla bituminosa.....	30
<b>3.6 Contenido de huecos y densidad máxima.....</b>	<b>31</b>
<b>3.7 Ensayo Fénix.....</b>	<b>34</b>
3.7.1 Generalidades.....	34
3.7.2 Descripción.....	34
3.7.3 Preparación de las probetas.....	37
3.7.4 Ejecución del Ensayo Fénix.....	38
<b>CAPÍTULO 4. RESULTADOS.....</b>	<b>40</b>
4.1 Introducción.....	40
4.2 Procesamiento de datos.....	40
4.3 Estudio de valores medios y coeficiente de variación.....	43
4.4 Test estadísticos.....	44
4.4.1 Test de Grubbs'.....	44
4.4.2 Descripción estadística.....	45
4.4.3 Límite de repetibilidad.....	45
4.4.4 Test de Kolmogorov-Smirnov.....	45
4.4.5 Test de Levene.....	46
4.4.6 Test de T-Student.....	47
4.5 Análisis de los resultados estadísticos.....	48
4.6 Análisis de resultados según las variables.....	50
4.6.1 Influencia de la altura de la probeta.....	50
4.6.1.1 Resultados T-Student.....	50
4.6.1.2 Porcentaje de huecos (%H).....	52
4.6.1.3 Índice de Rigidez a Tracción (IRT).....	52
4.6.1.4 Energía de Fractura (GF).....	53
4.6.1.5 Desplazamiento 50% de carga máxima postpico (d0,5 PM).....	53
4.6.2 Influencia del tamaño máximo de los áridos.....	53
4.6.2.1 Resultados T-Student.....	54
4.6.2.2 Porcentaje de huecos (%H).....	55
4.6.2.3 Índice de Rigidez a Tracción (IRT).....	55
4.6.2.4 Energía de Fractura (GF).....	55
4.6.2.5 Desplazamiento 50% de carga máxima postpico (d0,5 PM).....	56
4.6.3 Discusión de casos particulares.....	56
<b>CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES.....</b>	<b>57</b>
5.1 Conclusiones del trabajo.....	57
5.2 Futuras líneas de investigación.....	58
<b>CAPÍTULO 6. BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>59</b>
Otra bibliografía.....	59

**ANEJOS**

**ANEJO 1:**

Geometría de las probetas y densidades.....60

**ANEJO 2:**

Gráficas ensayo Fénix.....76

**ANEJO 3:**

Tablas resumen resultados Fénix.....92

**ANEJO 4:**

Test de Levene.....100

**ANEJO 5:**

Test T-Student.....132

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 2.1 – Vía asfaltada.....	4
Ilustración 2.2 – Fisuración transversal.....	9
Ilustración 2.3 – Fisuración longitudinal.....	10
Ilustración 2.4 – Fisuración por fatiga.....	10
Ilustración 2.5 – Fisuración de borde.....	11
Ilustración 2.6 – Fisuración en bloque.....	12
Ilustración 2.7 – Fisuración por reflexión de juntas.....	12
Ilustración 2.8 – Acción de la carga en el ensayo IDT.....	13
Ilustración 2.9 – Rotura probeta ensayo IDT.....	14
Ilustración 2.10 – Geometría probeta ensayo SCB.....	15
Ilustración 2.11 – Geometría probeta ensayo DCT.....	16
Ilustración 2.12 – Rotura probeta ensayo DCT.....	16
Ilustración 2.13 – Probeta ensayo CTD.....	17
Ilustración 2.14 – (1) Proceso fabricación de la probeta (2) Bases de las probetas (3) Probeta lista para ser ensayada.....	18
Ilustración 2.15 – Probeta Fénix colocada y gráfica C-D.....	19
Ilustración 3.1 – Muestra filler.....	24
Ilustración 3.2 – Tamizadora.....	27
Ilustración 3.3 – Capazos divididos por tamaño de árido.....	28
Ilustración 3.4 – Limpieza fino.....	28
Ilustración 3.5 – Áridos preparados en bandejas.....	29
Ilustración 3.1 – Proceso adición betún y filler en la fabricación.....	30
Ilustración 3.1 – Máquina Marshall.....	31
Ilustración 3.8 – Muestra desgranada.....	32
Ilustración 3.9 – Bañera con agua destilada.....	33
Ilustración 3.10 – Curva Carga-Desplazamiento.....	35
Ilustración 3.11 – Probetas ensayo Fénix.....	37
Ilustración 3.12 – Colocación para pegado y secado probetas Fénix.....	38
Ilustración 3.13 – Antes y después del ensayo Fénix.....	39
Ilustración 3.14 – Equipo Fénix.....	39
Ilustración 4.1 – Gráfica C-D AC-22S 20°C 6cm, probetas 9-12.....	41
Ilustración 4.2 – Gráfica C-D AC-22S 5°C 6cm, probetas 9-12.....	41



## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 – Husos granulométricos. Cernido acumulado.....	7
Tabla 3.1 – Husos granulométricos UNE-EN 933-2.....	23
Tabla 3.2 – Granulometría AC-16S.....	23
Tabla 3.3 – Granulometría AC-22S.....	23
Tabla 3.4 – Requisitos de los betunes modificados con polímeros.....	24
Tabla 3.5 – Tabla granulométrica AC-16S 4cm.....	25
Tabla 3.6 – Tabla granulométrica AC-16S 6cm.....	25
Tabla 3.7 – Tabla granulométrica AC-22S 4cm.....	26
Tabla 3.8 – Tabla granulométrica AC-22S 6cm.....	26
Tabla 3.9 – Pesos filler.....	29
Tabla 4.1 – Tabla resumen AC-22S 20°C 6cm.....	42
Tabla 4.2 – Valores medios de los parámetros Fénix.....	43
Tabla 4.3 – Coeficientes de variación de los parámetros Fénix.....	43
Tabla 4.4 – Parámetros AC-16S 4cm 5°C.....	48
Tabla 4.5 – Parámetros AC-16S 6cm 5°C.....	48
Tabla 4.6 – Parámetros AC-16S 4cm 20°C.....	49
Tabla 4.7 – Parámetros AC-16S 6cm 20°C.....	49
Tabla 4.8 – Parámetros AC-22S 4cm 5°C.....	49
Tabla 4.9 – Parámetros AC-16S 6cm 5°C.....	49
Tabla 4.10 – Parámetros AC-16S 4cm 20°C.....	49
Tabla 4.11 – Parámetros AC-16S 6cm 20°C.....	49
Tabla 4.12 – Resultados test T-Student AC-16S 5°C: 4cm vs 6cm.....	51
Tabla 4.13 – Resultados test T-Student AC-16S 20°C: 4cm vs 6cm.....	51
Tabla 4.14 – Resultados test T-Student AC-22S 5°C: 4cm vs 6cm.....	51
Tabla 4.15 – Resultados test T-Student AC-22S 20°C: 4cm vs 6cm.....	51
Tabla 4.16 – Resumen resultados test T-Student variación altura de la probeta.....	51
Tabla 4.17 – Resultados test T-Student 4cm 5°C: AC-16S vs AC-22S.....	54
Tabla 4.18 – Resultados test T-Student 4cm 20°C: AC-16S vs AC-22S.....	54
Tabla 4.19 – Resultados test T-Student 6cm 5°C: AC-16S vs AC-22S.....	54
Tabla 4.20 – Resultados test T-Student 6cm 20°C: AC-16S vs AC-22S.....	54
Tabla 4.21 – Resumen resultados test T-Student variación tamaño máximo de árido.....	54



# CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1 Introducción

Las infraestructuras son todas aquellas realizaciones diseñadas para el soporte y crecimiento de actividades fundamentales de la sociedad, aportando organización estructural a las ciudades y funcionalidad. Dentro de las infraestructuras, podemos distinguir cinco grandes grupos:

- Infraestructuras del transporte: puede ser terrestre, marítimo y aéreo.
- Infraestructuras energéticas: redes de electricidad, de energía, de combustibles, etc.
- Infraestructuras hidráulicas: redes de agua potable, de desagüe o de reciclaje.
- Infraestructuras de telecomunicaciones: redes de telefonía, de televisión, fibra óptica, etc.
- Infraestructuras de edificación: vivienda, comercio, salud, industria, etc.

La demanda de todas estas infraestructuras es innegable, es evidente la dependencia que tiene nuestra sociedad respecto a ellas, así como la necesidad de disponer de un mínimo de calidad para el buen funcionamiento de las mismas. Para promover esta calidad garantizada son necesarios un conjunto de estudios previos que nos permitan prever el comportamiento de dichas infraestructuras a las solicitudes que se verán expuestas, ya sean humanas, medioambientales, de maquinaria...

Centrándonos en las infraestructuras de transporte, podemos analizar las cifras sobre las que se reparte el porcentaje de transporte de mercancías y pasajeros dentro de la Unión Europea. Podemos ver como en el transporte de mercancías por vía terrestre, el cual agrupa el transporte por carretera y por ferrocarril, suma un 54% del total, dejando en segundo lugar el transporte de mercancías marítimo con un 42%, y con el 3% restante el transporte aéreo. Aunque si en el transporte de mercancías ya hay una evidencia de la importancia del transporte terrestre, esta importancia se acusa más al transporte de pasajeros, colocándose con un 81% frente al 8% del aéreo, por ejemplo. <sup>[1]</sup>

De esta manera, nos encontramos con el transporte terrestre, concretamente el viario, es un tipo de movilidad fundamental para el desarrollo económico de las ciudades y para la movilización de población. De esta manera, parece lógico comentar la necesidad de la que hablábamos anteriormente sobre el buen estado de las infraestructuras, ya que tendrán una relación directa sobre su uso. Debemos asegurar un uso vial seguro, confortable y con capacidad de soportar elevados puntos de esfuerzos debidos al flujo de movilidad.

En el transporte viario nos encontramos con el firme, el cual es el elemento principal de dicha infraestructura. Este elemento está compuesto por un riego de adherencia previo a cualquier capa, por una capa base con una funcionalidad estructural, por una capa intermedia compuesta por una mezcla bituminosa (esta capa puede no existir dependiendo de la necesidad de la carretera), y por una capa de rodadura en la parte superficial, la cual exige una mayor calidad ya que debe dotar de óptimas propiedades de rodadura y antideslizantes al estar en contacto directo con el tráfico.

Todas las capas que conforman una carretera, en especial la capa de rodadura por ser la más superficial, pueden verse afectadas por las solicitaciones del tráfico o las medioambientales, hecho que provocará tareas de mantenimiento o, en casos extremos donde lleguen a producirse grietas o fisuras, tener que intervenir para su reparación. Las tareas de mantenimiento o de reparación implican un mayor coste económico y un colapso de la vía a reparar, afectando a la movilidad que proporcionaba la infraestructura. Por este motivo es evidente la necesidad de hacer un estudio previo de las mezclas bituminosas que usaremos para dimensionar un firme, siendo una de las prioridades de las investigaciones de la ingeniería en carreteras.

Estos estudios se denominan ensayos, y se realizan mediante probetas extraídas del mismo pavimento a estudiar o fabricadas con el mismo material con el que se ha diseñado la carretera. Los ensayos que realizamos deben ser fiables, estar regidos dentro de la Norma Española, aportando a su vez sensibilidad a los distintos parámetros que se le distinguen a las mezclas, y siendo fáciles de realizar y de analizar estadísticamente los resultados que aportan.

## **1.2 Objetivos del trabajo**

El objeto del presente trabajo es poner en estudio la sensibilidad del ensayo Fénix, un ensayo a tracción desarrollado por la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC) para analizar la resistencia a la fisuración que es capaz de soportar una mezcla bituminosa densa. Nos centraremos en el análisis y comparación de mezclas bituminosas continuas de diferente tamaño de árido (AC-16S y AC-22S) y de diferente altura de probeta, ensayándolas a dos temperaturas distintas (5°C y 20°C) para poder ver su comportamiento y la sensibilidad que nos proporciona.

### **1.3 Descripción de los capítulos**

Dividiremos el trabajo en cinco capítulos.

El primer capítulo es el presente, en el cual hacemos una introducción general y mostramos el interés y la importancia del estudio.

El segundo capítulo se corresponde al estado del arte, donde analizamos las mezclas bituminosas, centrándonos un poco más en la que exponemos a estudio en este trabajo, así como a las propiedades que deben tener las mezclas dispuestas en la capa de rodadura, y terminamos analizando brevemente los principales ensayos que existen para estudiar la mecánica de fractura en dichas muestras.

El tercer capítulo describiremos la metodología seguida en el Laboratorio de la Universidad Politécnica de Cataluña para la fabricación de las probetas.

El capítulo número cuatro nos introduce en el estudio estadístico realizado para medir la sensibilidad del ensayo Fénix, definiendo los cálculos realizados y, analizando y comparando posteriormente el comportamiento de las probetas según las variables predefinidas.

Y para finalizar, en el capítulo cinco se describen las conclusiones generadas al terminar el estudio.

Al término del trabajo podemos encontrar las referencias bibliográficas y los anejos.

## **CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE**

### **2.1 Introducción**

En el siguiente capítulo veremos algunas generalidades de cómo está constituida una carretera, definiremos y analizaremos las mezclas bituminosas, en especial el tipo AC (del inglés “Asphalt Concrete”), el cual ha sido sometido a ensayos Fénix posteriormente para concluir la resistencia de la que disponen y la relación que hay variando ciertas características de fabricación o de dimensionamiento de un mismo tipo de mezcla bituminosa con otro.

### **2.2 Generalidades**

Las carreteras son vías de transporte proyectadas y construidas para la circulación de vehículos. Estas vías están constituidas por un conjunto de capas colocadas horizontalmente sobre el terreno que, adecuadamente compactadas, proporcionaran una superficie de rodadura segura y cómoda, una resistencia óptima para las solicitaciones de tráfico previstas para ese tramo, y así mismo proporcionan una protección a la explanada contra los agentes externos.



*Ilustración 2.1 - Vía asfaltada*

Las diferentes capas horizontales que constituyen una carretera son:

- Capa de rodadura: es la capa más superficial, la que está en contacto con las ruedas de los vehículos, por lo que deberá regirse por los requisitos funcionales y fundamentales de la superficie de la carretera, cómo la resistencia al deslizamiento, impermeabilidad, durabilidad alta, reducción de ruido...
- Capa intermedia: Son las encargadas de soportar las altas presiones de cizallamiento que se producen por debajo de la capa.
- Capa base: es la capa más estructural, puede haber una o más de una. Está diseñada para distribuir y soportar de manera efectiva el tráfico y las cargas.

## **2.3 Mezclas bituminosas**

### ***2.3.1 Definición***

Las mezclas bituminosas son todas aquellas resultantes de la combinación de áridos, ligantes hidrocarbonados y, en algunas ocasiones, aditivos. Estos elementos son mezclados a altas temperaturas para que el ligante sea capaz de envolver por completo mediante una película a los áridos de la mezcla. Los áridos son un material elastoplástico y el betún viscoelástico, por lo tanto, se considera que las mezclas bituminosas son un material viscoelastoplástico. Éstas mezclas se fabrican en centrales fijas o móviles y posteriormente se transportan a obra para su extendido y compactación. Debido a las características del betún, las mezclas bituminosas tienen un comportamiento que depende de la temperatura y la velocidad de aplicación de las cargas. Sólo en determinadas condiciones se puede considerar que tienen un comportamiento elástico y lineal. Estas condiciones son cuando las temperaturas se dan bajas y la velocidad de aplicación de las cargas es elevada.

### ***2.3.2 Clasificación y nomenclatura de las mezclas***

La actual normativa española 6.1 IC sobre secciones de firmes clasifica los firmes en:

- Firmes Flexibles: que son los constituidos por capas granulares no tratadas y materiales bituminosos en un espesor inferior a 15 cm.
- Firmes Semiflexibles: en los que el espesor de los materiales bituminosos sobre capas granulares no tratadas iguala o supera los 15 cm.
- Firmes semirrígidos: son los constituidos por materiales bituminosos en cualquier espesor sobre una o más capas tratadas con conglomerantes hidráulicos o puzolánicos, siendo el espesor conjunto de éstas igual o superior a 18 cm y con un comportamiento que garantice todavía una contribución significativa a la resistencia estructural del conjunto del firme.

- Firmes rígidos: son los constituidos por pavimentos de hormigón, generalmente losas, que se pueden colocar directamente sobre la explanada o bien sobre una capa soporte que puede estar o no, tratada.
- Otros tipos de firme: Existen otros firmes constituidos a base de adoquines, losas, aceras, etc.

Actualmente, la designación de las mezclas bituminosas ha cambiado a la nomenclatura establecida en la UNE-EN-13108-1, según la orden circular 24/2008 por el que se modifica algunos artículos del PG-3.

Esta designación se complementará con información sobre el tipo de granulometría que corresponda a la mezcla: densa, semidensa o gruesa, con el fin de poder diferenciar mezclas con el mismo tamaño máximo de árido, pero con husos granulométricos diferentes. Para ello, a la designación establecida en la UNE – EN 13108-1, se añadirá la letra D, S o G después de la indicación del tamaño máximo de árido, según se trate de una mezcla densa, semidensa o gruesa, respectivamente.

Por ejemplo, la designación de las mezclas bituminosas seguirá el esquema siguiente:

AC	D	Surf/bin/base	ligante	granulometría
----	---	---------------	---------	---------------

Donde:

- AC: (Asphalt Concrete) indica que la mezcla es de tipo hormigón bituminoso
- D: es el tamaño del árido, expresado como la abertura del tamiz que deja pasar entre un noventa y un cien por cien (90% y 100%) del total del árido.
- Surf/bin/base: se indicará con estas abreviaturas si la mezcla se va a emplear en capa de rodadura, intermedia o base, respectivamente.
- Ligante: se debe incluir la designación del tipo de ligante hidrocarbonato utilizado.
- Granulometría: se indicará con la letra D, S o G si el tipo de granulometría corresponde a una mezcla densa(D), semidensa (S) o gruesa (G) respectivamente. En el caso de mezclas de alto módulo se añadirán además las letras MAM.

La granulometría del árido obtenido combinando las distintas fracciones de los áridos (incluido el polvo mineral), según la unidad de obra o empleo, deberá estar comprendida dentro de alguno de los husos fijados en la tabla 542.9. El análisis granulométrico se hará según la UNE-EN 933-1.



**Tabla 542.9**  
**Husos granulométricos. Cernido acumulado (% en masa)**

Tipo de mezcla		Abertura de los tamices UNE-EN 933-2 (mm)									
		45	32	22	16	8	4	2	0,500	0,250	0,063
Densa	AC16D	—	—	100	90-100	64-79	44-59	31-46	16-27	11-20	4-8
	AC22D	—	100	90-100	73-88	55-70		31-46	16-27	11-20	4-8
Semidensa	AC16S	—	—	100	90-100	60-75	35-50	24-38	11-21	7-15	3-7
	AC22S	—	100	90-100	70-88	50-66		24-38	11-21	7-15	3-7
	AC32S	100	90-100		68-82	48-63		24-38	11-21	7-15	3-7
Gruesa	AC22G	—	100	90-100	65-86	40-60		18-32	7-18	4-12	2-5
	AC32G	100	90-100		58-76	35-54		18-32	7-18	4-12	2-5

(\*) A efectos de esta tabla, para designar el tipo de mezcla, se incluye sólo la parte de la nomenclatura que se refiere expresamente al huso granulométrico (se omite, por tanto, la indicación de la capa del firme y del tipo de betún).

— Para la formulación de mezclas bituminosas en caliente de alto módulo (MAM) se empleará el huso AC22S con las siguientes modificaciones, respecto a dicho huso granulométrico: tamiz 0,250: 8-15; y tamiz 0063: 5-9.

*Tabla 2.1 - Husos granulométricos. Cernido acumulado*

Así mismo, en el Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares también vienen definidos el tipo de mezcla bituminosa en caliente a emplear en función del tipo y espesor de la capa del firme (tabla 542.10 del Pliego), la dotación mínima que hay que fijar de ligante hidrocarbonado de la mezcla bituminosa en caliente (en la tabla 542.11 del Pliego), y la relación ponderal recomendable entre el contenido de polvo mineral y de ligante (en la tabla 542.12 del Pliego).

En nuestro estudio hemos usado mezclas del tipo AC16-S y AC22-S, para capas de rodadura.

### **2.3.3 Composición mezclas AC**

Como se ha comentado anteriormente, las mezclas bituminosas están compuestas por áridos, ligantes y aditivos, aunque en nuestro estudio no hemos añadido ningún tipo de aditivo.

#### **2.3.3.1 Áridos**

Los áridos son un conjunto de partículas minerales de distintos tamaños que proceden de la fragmentación natural o artificial de las rocas. Puede haber tres tipos de árido según su origen:

- **Áridos naturales:** pueden tener una forma redondeada a causa de su naturaleza o formas angulosas causadas por el machaqueo. Serían áridos naturales los provenientes de rocas calcáreas sedimentarias, de las arenas y gravas, y de las rocas ígneas y metamórficas.

- Áridos artificiales: proceden de un proceso industrial y son sometidas a modificaciones en su proceso. Un ejemplo serían las arcillas calcinadas.
- Árido reciclado: es el proveniente del reciclaje de residuos de obras, de construcciones, demoliciones o escombros.

La segunda clasificación que encontramos de los áridos viene dada por su tamaño, donde los áridos gruesos serán los retenidos en el tamiz 2mm de la UNE-EN 933-2:1996 y los áridos finos los que pasen el tamiz 2mm y que queden retenidos en el tamiz 0.063mm de la UNE-EN 933-2.

### ***2.3.3.2 Ligante***

Una vez tenemos los áridos, nos vemos necesitados de un componente que sea capaz de aglomerarlos y proporcionar cohesión y estabilidad a nuestra mezcla. Esa es la función del ligante hidrocarbonado, un producto bituminoso viscoso, de color oscuro, termoplástico y con buena adhesividad con los áridos. Observamos que hay varios tipos de ligante:

- Betún asfáltico: son ligantes obtenidos de refinar crudo asfáltico o como residuo de las refinerías de petróleo. Son productos bituminosos sólidos o viscosos, con características aglomerantes y solubles en sulfuro de carbono.
- Betún modificado: son ligantes hidrocarbonados modificados reológicamente usando uno o más polímeros orgánicos durante su fabricación. Con estas modificaciones mejoran propiedades como la tenacidad y la cohesión.
- Betún fluidificado: son ligantes obtenidos por adición a un betún de fracciones volátiles procedentes de la destilación del petróleo. Actualmente están en desuso por restricciones medioambientales.
- Emulsión bituminosa: son ligantes hidrocarbonados obtenidos mediante la adición de agua al betún asfáltico. Facilitan la puesta en obra reduciendo la viscosidad del betún. Son óptimos para aplicaciones con climas lluviosos y de temperaturas bajas.

Para nuestro ensayo hemos usado un betún modificado, en concreto el denominado PMB 45/80-60 o 65.

### ***2.3.4 Propiedades***

Centrándonos en nuestro estudio, las mezclas bituminosas para capa de rodadura sirven para soportar directamente los esfuerzos de los neumáticos de los vehículos y transmitir las cargas a las capas inferiores, respetando siempre determinadas características y exigencias de calidad.

Así pues, estas características funcionales deben registrarse teniendo en cuenta varios aspectos que son altamente incidentes en la capa más superficial, cómo serían la adherencia del neumático al firme, las proyecciones de agua en tiempo de lluvia, el desgaste producido por los neumáticos y el envejecimiento de estos, el ruido, la comodidad y estabilidad, las cargas del tráfico, la resistencia de la rodadura relacionada con el consumo de carburante, y las propiedades ópticas.

## **2.4 Fisuración**

La aparición de fisuras en la capa de rodadura siempre es una mala noticia, ya que ve afectadas sus propiedades reológicas, disminuyendo sus cualidades por las cuales ha sido proyectada. Estos fenómenos tienen una gran dificultad a la hora de expresarlos y analizarlos ya que se ven influidos por una gran cantidad de variables, desde características propias del material, espesor de la capa o su ejecución, hasta la afectación de los agentes externos como las cargas ejercidas por el tráfico o las condiciones climáticas.

Seguidamente expondremos los tipos de fisuración existentes, los cuales vienen dados por los agentes solicitantes que interactúan continuamente con el pavimento.

### ***2.4.1 Fisuración transversal***

Son fisuras con una orientación predominante perpendicularmente al eje del pavimento. Las principales causas son dadas por la repetición de cargas, de tensiones por alabeo y por contracción por secado. Esta última causa viene dada por el efecto térmico, generando tracciones en la superficie dando lugar a fisuraciones. También pueden venir dadas a causa de una mala ejecución o por la reflexión de las capas inferiores.



*Ilustración 2.2 - Fisuración transversal*

#### **2.4.2 Fisuración longitudinal**

Estas fisuras aparecen con una orientación longitudinal al eje del pavimento. Las causas posibles pueden ser por disponer de un espesor de calzada insuficiente o por una separación de juntas excesiva, por tener asentamientos de las diferentes capas diferenciales, o por una reflexión de juntas o fisuras de capas inferiores.



*Ilustración 2.3 - Fisuración longitudinal*

#### **2.4.3 Fisuración por fatiga**

También conocido como “piel de cocodrilo”. Es un tipo de fisuración que se da generalmente en áreas dónde el pavimento está más afectado por el impacto continuo del tráfico, con grandes cargas. Se da principalmente en la zona de rodadura de los vehículos, dónde la mezcla, a causa de dichas sollicitaciones, sufre una pérdida de sus propiedades estructurales causadas por la fatiga. Este tipo de fisuración se caracteriza por tener un patrón geométrico con múltiples grietas interconectadas entre sí, formando ángulos agudos.



*Ilustración 2.4 - Fisuración por fatiga*

Hay tres tipos de niveles de severidad:

- Bajo: cuando las fisuras casi que no están conectadas entre sí ni hay una expulsión de finos de las capas inferiores.
- Moderado: hay un mayor número de grietas interconectadas entre sí, pero sigue sin haber expulsión de finos desde las capas inferiores.
- Severo: las grietas se muestran totalmente interconectadas y además hay expulsión de finos desde las capas inferiores, así como trozos de pavimento desprendidos que se mueven con el paso del tránsito.

Y, finalmente, dentro de los deterioros de fisuración por fatiga, se diferencian dos mecanismos:

- Fisura ascendente (Bottom-up cracking): la fisura se genera en la capa base y se propaga hasta la superficie. Viene producido por tensiones y deformaciones causadas por el esfuerzo de tracción en la base de la capa asfáltica.
- Fisura descendente (Top-down fatigue cracking): la fisura se genera en la superficie y se propaga hasta la capa base. Ocurre en pavimentos de mayor espesor, a causa de las tensiones combinadas de tracción y corte en la superficie del pavimento.

#### **2.4.4 Fisuración de borde**

Las fisuras de borde se encuentran en los extremos laterales de la calzada, a no más de 0,6m del borde. Se caracterizan por formar grietas en forma de media luna. La atribución de este defecto viene dado a una base granular débil por falta de compactación y confinamiento. La infiltración de humedad causada por un drenaje insuficiente también puede dar lugar a este tipo de fisuraciones, ya que crea una alta inestabilidad en la base de la estructura del pavimento.



*Ilustración 2.5 - Fisuración de borde*

#### **2.4.5 Fisuración en bloque**

Es un tipo de fisuración caracterizado por presentar fisuras o grietas los cuales hacen una serie de formas rectangulares comprendidas entre 0,1 y 10 m<sup>2</sup>.



*Ilustración 2.6 - Fisuración en bloque*

La causa de estas fisuraciones viene dada principalmente por la climatología, concretamente por los cambios térmicos. Las mezclas con módulos de rigidez muy altos son las que se ven más afectadas. Otro posible aspecto que las provoca puede ser la falta de espesor o fatiga de las capas del firme, falta de capacidad de soporte de la estructura de pavimento o por una mala ejecución de las capas que componen el pavimento.

#### **2.4.6 Fisuración por reflexión de juntas**

Es un tipo de fisuración que se produce en las capas bituminosas que refuerzan un pavimento de hormigón, coincidiendo con las juntas y grietas de éste. Se reflejan en la superficie, pero tienen su origen en las capas inferiores, cuando se mueven las juntas del pavimento de hormigón situado en la capa inferior.



*Ilustración 2.7 - Fisuración por reflexión de juntas*

## 2.5 Ensayos de tracción

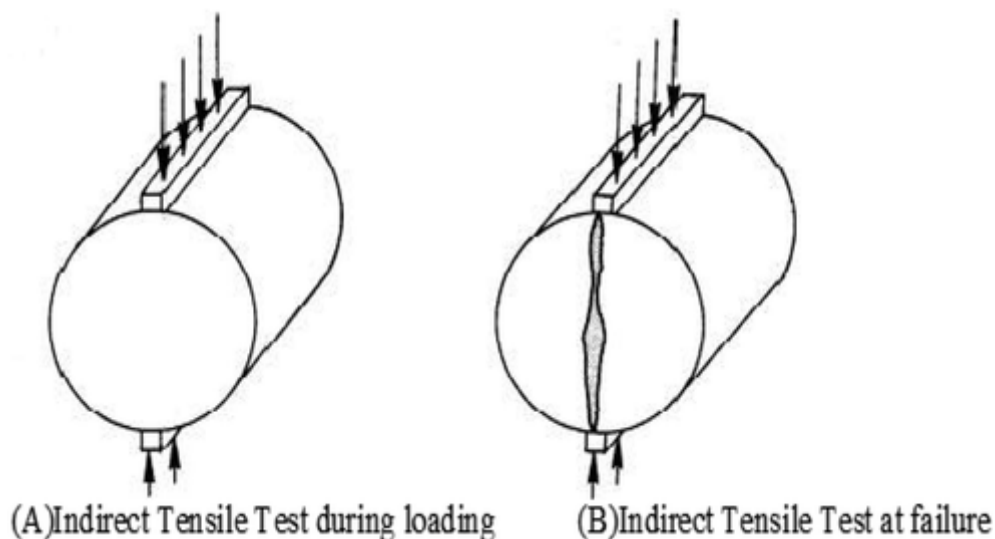
A continuación, analizaremos los diferentes ensayos a tracción que existen, los cuales nos permiten medir y dar unos parámetros sobre la calidad y el comportamiento de nuestra mezcla bituminosa a ciertos esfuerzos límite.

Los ensayos en general son esenciales para saber el comportamiento de los materiales usados en obra, para averiguar si su dimensionamiento es el óptimo para soportar las solicitaciones por el cual ha estado diseñado y desarrollado. Ya hemos visto las fisuraciones junto con sus causas, así que no cabe destacar cuán importante es la necesidad de valorar mediante un buen ensayo las cualidades y propiedades de las muestras a analizar, ya que nos podrán prevenir de futuros defectos en la mezcla y, consecuentemente, evitar daños a los usuarios de la vía.

Así mismo, una vez realizada la puesta en obra, se deberá mantener un control y un mantenimiento de la vía para poder garantizar el buen funcionamiento de la misma.

### 2.5.1 Indirect Tensile Test (IDT)

En español conocido como Ensayo de Tracción Indirecta, es un ensayo en el cual se somete la probeta a una compresión diametral aplicando uniformemente una carga a lo largo de dos generatrices distintas hasta alcanzar la rotura. Este tipo de carga crea esfuerzos de tracción muy parecidos a lo largo de todas las líneas de carga, afectando al plano diametral vertical, hasta que agota la probeta y provoca la rotura en dicho plano vertical.<sup>[2]</sup>



*Ilustración 2.8 - Acción de la carga en el ensayo IDT*

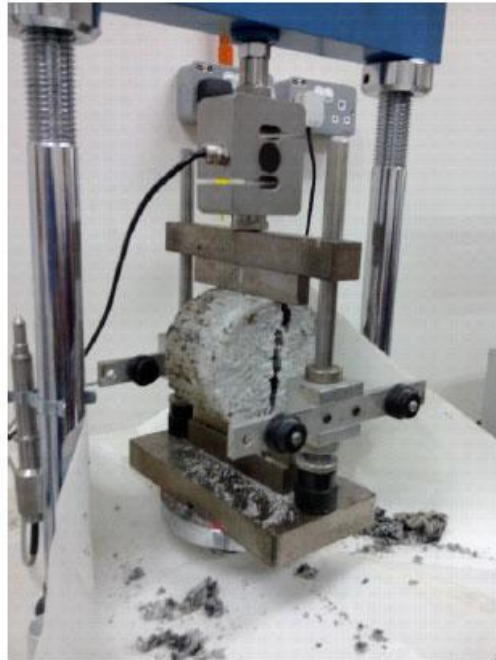
Es un ensayo usado para medir la carga de rotura de la probeta, el desplazamiento vertical y la deformación horizontal del diámetro de la probeta durante el tiempo que dura el ensayo.

La principal ventaja del ensayo de tracción indirecta es la sencillez de éste, un aspecto muy valorado para poder valorar de forma rápida, fiable y económica los pavimentos que gestionan. Por este motivo es uno de los más usados en todo el mundo.

Las principales ventajas del ensayo según un estudio realizado por el Departamento de Carreteras del Estado de Texas, dirigidos por Tomas Kennedy de la Universidad de Austin, son:

- Se trata de un ensayo relativamente sencillo
- Tiene similitud con otros ensayos tipo Marshall
- Probeta y utensilios de ensayo son los mismos que para otros ensayos
- Las condiciones de superficie de la probeta no influyen en la rotura
- La rotura tiene origen en un área relativamente uniforme de tensiones de tracción
- Tiene un coeficiente de variación bajo comparado con otros ensayos
- Puede realizarse bajo carga estática o dinámica

Aun así, es un ensayo que no es capaz de evaluar correctamente el potencial de fisuración de las mezclas asfálticas ya que la deformación permanente bajo las cargas no es efecto óptimo para su análisis. Además, la distribución de la deformación en el método de probetas no es bastante uniforme.



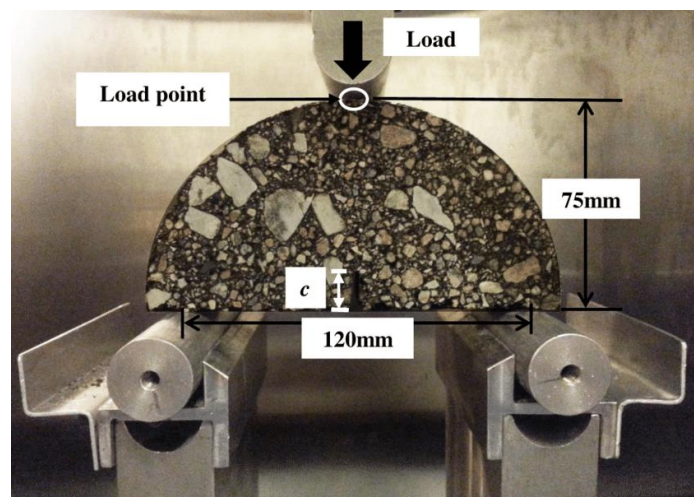
*Ilustración 2.9 - Rotura probeta ensayo IDT*



### 2.5.2 Semi-circular Bending Test (SCB)

Es un ensayo diseñado en la Universidad de Delft para medir la fractura en las mezclas bituminosas debida a las bajas temperaturas. Para este ensayo solo es necesaria media probeta circular, que proviene del corte por la mitad de una probeta cilíndrica común, con una muesca en el centro que recorre todo el diámetro verticalmente. Este corte crea una zona débil en la probeta, lo que facilita la fisuración y su propagación, por lo que el objeto del estudio es calcular la energía de esta fractura y la resistencia que tiene la probeta a la fractura.

Para la realización del ensayo se coloca el corte semicircular de la muestra sobre dos apoyos situados en los extremos, posteriormente se aplica una carga central que provoca la flexión de la probeta en su zona inferior, y allí es donde se coloca el medidor de deformaciones, el cual comprueba la abertura de la grieta que se está formando a medida que se está aplicando la carga.



*Ilustración 2.10 - Geometría probeta ensayo SCB*

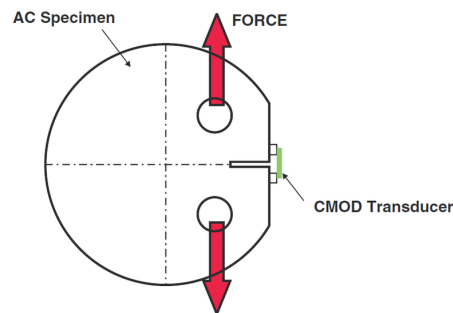
Es un ensayo regido y normalizado por la norma UNE-EN 12697-44 (AENOR 2001) en España, siendo el único apto por norma para ensayar y evaluar los efectos de la fisuración en mezclas bituminosas.

Los puntos positivos de este ensayo son su sencillez, que se necesitan menos cantidad de probetas gracias a que con una probeta circular podemos hacer dos ensayos, y la diversidad que te da el ensayo al poder aplicarlo tanto en testigos como en probetas.

Por otro lado, los puntos negativos que encontramos en dicho ensayo son referentes a la aplicación de la carga, ya que al aplicarla crea un estado tensional en la probeta generando muchos esfuerzos de compresión en el área próxima a la fisura. <sup>[3]</sup>

### 2.5.3 Disk-Shaped Compact Tension Test (DCT)

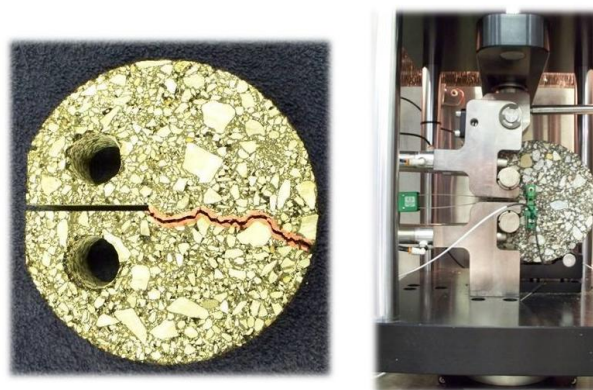
El ensayo Disk-Shaped Compact Tension Direct es un ensayo de tracción directa ideado en la Universidad de Illinois, en Estados Unidos. Para este ensayo se necesita una probeta circular fabricada en el laboratorio mediante compactación giratoria o mediante testigos cilíndricos. Una vez obtenidas las muestras cilíndricas, para adaptarlas al ensayo, debemos realizar dos orificios circulares, cada uno a un lado de una muesca que le haremos cortándola, y en dichos orificios es donde se aplicará la carga a tracción. Estos parámetros están regidos y recogidos en la norma ASTM D7313-07.



*Ilustración 2.11 - Geometría probeta ensayo DCT*

El ensayo DCT nos servirá para obtener y determinar, tanto durante como al final, la variación de la energía de fractura mecánica que se obtiene al aplicar distintas velocidades en la aplicación de la carga.

Es un ensayo que destaca por el gran tamaño en el área de fractura y porque permite también la aplicación de testigos. Aun así, el principal inconveniente es el proceso de fabricación o de puesta a punto para ensayarlo, ya que se requiere un arduo trabajo en la realización de las muescas y de los orificios circulares, dando pie a posibles pequeñas fisuras las cuales alterarían el resultado del ensayo.



*Ilustración 2.12 - Rotura probeta ensayo DCT*

#### **2.5.4 Ensayo Cataluña Tracción Directa (CTD)**

El Ensayo Cataluña de Tracción Directa consiste en medir y determinar distintos parámetros de las mezclas bituminosas como su tenacidad o la deformación de rotura. Es útil para la mejora del sistema de diseño de las muestras, aportando información esencial para crear mezclas más óptimas.

Para este ensayo se requiere de probetas prismáticas con un pequeño corte central que se le debe realizar, dónde se le pondrán unos extensómetros que posteriormente nos servirán para medir la rotura. Dichas probetas pueden ser fabricadas en laboratorio o extraídas in-situ. Una vez obtenidas o fabricadas las muestras, éstas van dentro de una cámara con la capacidad de controlar y regular la temperatura interior, se sujetan por los extremos y se crea una tensión hasta llegar al punto de rotura requerido. Los extensómetros recogerán los datos provocados en la fisura por unos pistones que son los encargados de crear esta tensión a una velocidad constante de 0,1 mm/min. Quedarán registrados los datos de la carga aplicada y de la deformación sufrida por las cargas tensionales. <sup>[4]</sup>

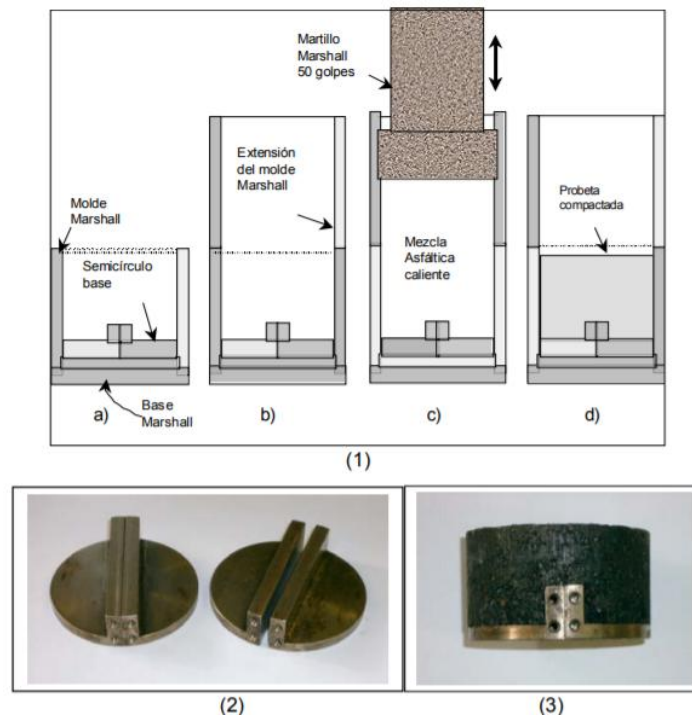


*Ilustración 2.13 - Probeta ensayo CTD*

#### **2.5.5 Ensayo Barcelona Tracción Directa (BTD)**

El siguiente ensayo sobre el que hablaremos se denomina Ensayo Barcelona de Tracción Directa, el cual recoge el nombre de la ciudad en el que se encuentra nuestra universidad ya que fue creado en 1997 en el Laboratorio de Caminos de la Universidad Politécnica de Cataluña, para poder evaluar la resistencia a fisuración de las muestras bituminosas de una manera rápida y sencilla. <sup>[5]</sup>

Para la realización de este ensayo se requiere un procedimiento específico durante su fabricación, usando una compactadora Marshall con un molde formado por dos semicírculos con un resalto en la parte central. Dicho resalto provoca una debilidad en la muestra, lo que propicia la formación de un plano de fisuración y, a su vez, crea un sistema de anclaje donde aplicar los esfuerzos de tracción para su posterior ensayo.



*Ilustración 2.14 - (1) Proceso fabricación de la probeta (2) Bases de las probetas (3) Probeta lista para ser ensayada*

Al ensayarla se aplica una tracción a velocidad constante, provocando que la fisura se vaya expandiendo por la zona debilitada anteriormente por el resalto del molde. Gracias a este ensayo podremos determinar la energía de fractura, el módulo de carga, la resistencia a tracción y la deformación en rotura de las muestras bituminosas ensayadas.

Existen dos tipos de ensayos BTB:

- Ensayo estático: determina la energía y la deformación de rotura de la mezcla a una velocidad de deformación fija.
- Ensayo dinámico: determina el comportamiento de fatiga aplicando una carga sinodal de amplitud y frecuencia constantes.

Todo y esto, existe algún inconveniente en lo que a este ensayo se refiere, el primero sería que realmente la probeta no se encuentra en un estado de tracción puro, ya que existen compresiones en el lado opuesto de la carga, provocando interferencias o complicaciones en sus cálculos. El otro inconveniente evidente es debido a su particularidad en la fabricación, haciendo de ello un problema en su aplicación a testigos.

### 2.5.6 Ensayo Fénix

Finalmente, llegamos al Ensayo Fénix, el cual es objeto de estudio de la presente tesis.

Es de los ensayos desarrollado más recientemente, fue ideado en la Universidad Politécnica de Cataluña, dentro del marco del Proyecto CENIT: Investigación Estratégica de Carreteras más Seguras y Sostenibles, Acrónimo: FÉNIX. Se realiza a tracción, sobre probetas semicilíndricas con una muesca en el centro que propicia la creación de la fisura. Analiza y determina el comportamiento de las mezclas bituminosas a fractura y la caracterización frente a los fenómenos de fisuración.<sup>[6]</sup>

Para la ejecución del ensayo, como hemos comentado anteriormente, debemos cortar una probeta cilíndrica por la mitad, realizándole una muesca en medio, y posteriormente pegar sus extremos planos a unas placas de acero con un determinado pegamento, dejando una distancia de 5mm entre placas. Una vez endurecido el pegamento, se pone la muestra dentro de una cámara climatizada, acollando las placas por sus extremos mediante unos pasadores, dejando la muestra colocada verticalmente. Determinando la temperatura deseada se aplica una carga tensional a las placas en sentido vertical, a una velocidad constante de 1 mm/min.

En el ensayo obtendremos los datos generados por el desplazamiento provocado a causa de la tensión aplicada, dibujando una gráfica con una curva carga-desplazamiento. En cuanto a los parámetros mecánicos que obtendremos serán el Índice de Tenacidad IT, el Índice de Rigidez a Tracción IRT, la carga máxima a tracción  $F_{max}$ , el desplazamiento a carga máxima  $\Delta F_{max}$  y el desplazamiento de rotura  $\Delta R$ . Más adelante, en el capítulo 3 correspondiente a la parte experimental, serán definidos todos estos parámetros.

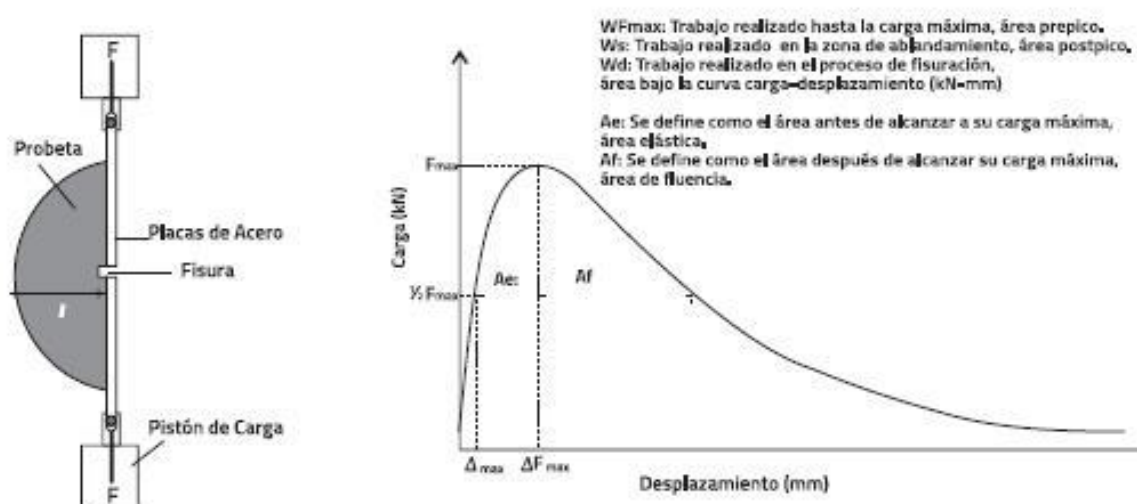


Ilustración 2.15 - Probeta Fénix colocada y gráfica C-D

Como podemos observar es un ensayo fácil de hacer y por lo tanto práctico, ya que no requiere mucha complejidad la elaboración y la puesta a punto de las probetas. Además, se puede ensayar en un amplio rango de temperaturas y con probetas fabricadas en laboratorio o testigos de la obra.

Es un ensayo muy usado experimentalmente a causa de su efectividad, validez y sensibilidad. Y, precisamente este último motivo, es la meta de este trabajo, ya que se entiende la sensibilidad como la capacidad para percibir variaciones en el resultado al variar un único parámetro o varios parámetros, habiendo variado nosotros los parámetros de granulometría, altura de la probeta y la temperatura a la cual será ensayada.

Para dicho estudio evaluamos la repetibilidad mediante los valores del coeficiente de variación  $C_v$  y usando varios test estadísticos comparativos entre ellos para determinar el grado de significación de un tipo de muestra frente a otra variando determinados parámetros (mencionados anteriormente).

## CAPÍTULO 3. ESTUDIO EXPERIMENTAL

### 3.1 Introducción

En el presente capítulo hablaremos sobre el desarrollo del plan experimental, es decir, daremos una descripción detallada del trabajo práctico realizado durante la ejecución de la tesis.

Describiremos el plan de trabajo que teníamos diseñado y su ejecución, incluyendo la preparación del material, el proceso de fabricación y los ensayos realizados a cada probeta.

El objetivo final del estudio es definir la sensibilidad del ensayo Fénix sobre mezclas continuas, variando el tamaño máximo de árido y la altura de la probeta.

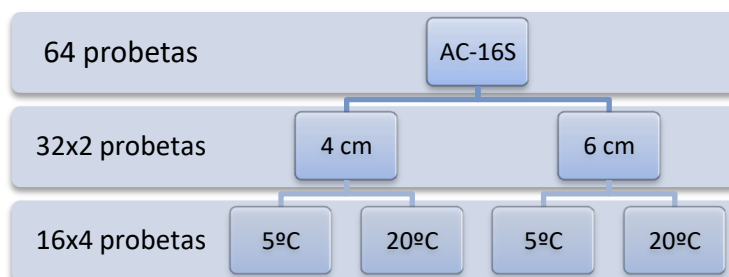
La resolución de esta parte de la tesis se ha realizado en el Laboratorio de Caminos del Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental y del Territorio de la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC).

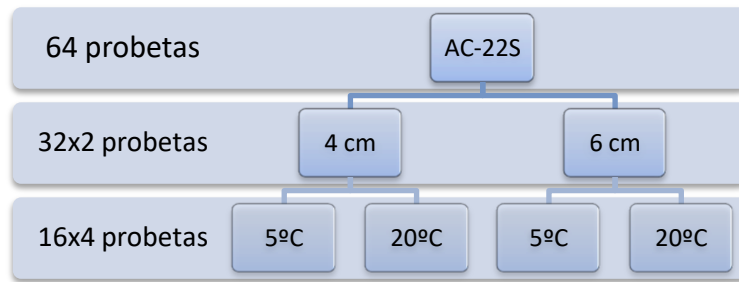
### 3.2 Plan de trabajo

El plan de trabajo rige la elaboración de 4 series de 16 probetas cada una de mezclas bituminosas densas, en este caso dos del tipo AC-16S (una de 4 cm y la otra de 6 cm de altura) y dos del tipo AC-22S (de 4 cm y 6 cm de altura también).

De esta manera nos quedan un total de 64 probetas a fabricar y ensayar, las cuales, una vez fabricadas, se cortarán debidamente por la mitad, quedando una mitad llamada “A” que se ensayará a 20°C, y otra mitad llamada “B” que se ensayará a 5°C.

La esquematización de las probetas sería la siguiente:





Una vez obtenidos los resultados de los ensayos de cada probeta, los procesaremos y los compararemos entre sí para ver si guardan alguna relación entre ellos o si, por lo contrario, podemos observar diferencias significativas.

Si alguna de las probetas no obtuviera unos resultados denominados normales a causa de roturas o deterioros en el proceso de fabricación, se eliminaría.

### 3.3 Materiales empleados

Para la realización de las probetas se determinaron una serie de materiales los cuales están regidos por el PG-3, artículo 543.

Las probetas están compuestas por materiales en dos estados distintos:

- Material sólido: compuesta de áridos y filler.
- Material viscoso: llamado betún, es una mezcla de líquidos orgánicos viscosos, formados de hidrocarburos aromáticos policíclicos.

#### 3.3.1 Áridos

Como hemos comentado anteriormente, usaremos dos tipos de áridos, el grueso y el fino. Para clasificarlos, según el PG-3 artículo 543, el tamiz 2mm es el que crea la barrera entre uno y otro. El que sobrepasa dicho tamiz es el árido fino mientras, que el que se queda retenido, se corresponde con el árido grueso.

Para la elección de los áridos hay que tener en cuenta dos cosas para que tengan un buen funcionamiento: la función a desempeñar de la capa que estamos proyectando y la afinidad árido-betún.



El árido grueso usado es pórfido, lo que significa que proviene de rocas filonianas. Este tipo de rocas se forman a grandes temperaturas ya que provienen de la solidificación del magma. Cuando el magma se enfría genera una formación cristalina de cuarzo y feldespato principalmente, con altos contenidos de silicio. La principal característica funcional que aportará este tipo de árido es la resistencia al pulimiento.

El árido fino usado es calizo, lo que significa que proviene de rocas calizas, muy comunes en España. Es un tipo de árido óptimo para la fabricación de probetas de mezclas bituminosas ya que presentan una mayor adhesividad en este tipo de mezclas. Además, es un tipo de árido hidrófobo, lo que significa que repele el agua, algo positivo para una mezcla bituminosa de rodadura porque mejora la adhesividad árido-ligante.<sup>[7]</sup>

Tanto el árido grueso como el árido fino provienen de la Cantera Foj, la cual se encuentra situada en Vallirana (Barcelona).

Según la tabla 542.8 Husos Granulométricos de la UNE-EN 933-2, los porcentajes en la granulometría están regidos en un rango:

TIPO DE MEZCLA		ABERTURA DE LOS TAMICES. NORMA UNE-EN 933-2 (mm)									
		45	32	22	16	8	4	2	0,500	0,250	0,063
RODADURA	AC16 D			100	90-100	64-79	44-59	31-46	16-27	11-20	4-8
	AC22 D			90-100	73-88	55-70		31-46	16-27	11-20	4-8
SEMIDENSA	AC16 S		100	100	90-100	60-75	35-50	24-38	11-21	7-15	3-7
	AC22 S		100	90-100	70-88	50-66		24-38	11-21	7-15	3-7
	AC32 S	100	90-100		68-82	48-63		24-38	11-21	7-15	3-7
GRUESA	AC22 G		100	90-100	65-86	40-60		18-32	7-18	4-12	2-5
	AC32 G	100	90-100		58-76	35-54		18-32	7-18	4-12	2-5

Tabla 3.1 - Husos granulométricos UNE-EN 933-2

De esta manera, la granulometría definida para nuestra tesis es la siguiente:

Granulometría AC-16S								
Tamiz (mm)	22	16	8	4	2	0,5	0,25	0,063
Pasa (%)	100	95	67,5	42,5	31	16	11	5

Tabla 3.2 - Granulometría AC-16S

Granulometría AC-22S								
Tamiz (mm)	32	22	16	8	2	0,5	0,25	0,063
Pasa (%)	100	95	79	58	31	16	11	5

Tabla 3.3 - Granulometría AC-22S

### 3.3.2 Filler

Para el filler usamos carbonato cálcico. Se trata de un compuesto químico el cual forma parte de la composición de estructuras geológicas y de origen orgánico de naturaleza caliza. Es un componente fundamental, por ejemplo, en la producción de cemento, entre otros productos.



Ilustración 3.1 - Muestra de filler

### 3.3.3 Betún

En nuestro estudio hemos usado un betún PMB 45/80-65 para la fabricación de las probetas. Se trata de un betún asfáltico modificado con polímero obtenido por reacción química entre el ligante base y polímeros especiales que permiten una mejor fabricación y puesta en obra, cumpliendo con las especificaciones de la tabla 212.2 Requisitos de los Betunes Modificados con Polímeros, del Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3).

Éstas son sus características:

DENOMINACIÓN UNE-EN 14023			PMB 10/40-70	PMB 25/55-65	PMB 45/80-60	PMB 45/80-65	PMB 45/80-75	PMB 75/130-60
CARACTERÍSTICAS		UNE-EN UNIDAD	Ensayos sobre el betún original					
PENETRACIÓN A 25°C		1426	0,1 mm	10-40	25-55	45-80	45-80	75-130
PUNTO DE REBLANDECIMIENTO		1427	°C	≥70	≥65	≥60	≥65	≥60
COHESIÓN. FUERZA-DUCTILIDAD		13589 13703	J/cm²	≥2 a 15°C	≥2 a 10°C	≥2 a 5°C	≥3 a 5°C	≥1 a 5°C
PUNTO DE FRAGILIDAD FRAASS		12593	°C	≤-5	≤-7	≤-12	≤-15	≤-15
RECUPERACIÓN ELÁSTICA A 25° C		13398	%	TBR	≥50	≥50	≥70	≥60
ESTABILIDAD AL ALMACENAMIENTO (*)	DIFERENCIA DE PUNTO DE REBLANDECIMIENTO	13399 1427	°C	≤5	≤5	≤5	≤5	≤5
	DIFERENCIA DE PENETRACIÓN	13399 1426	0,1 mm	≤9	≤9	≤9	≤9	≤9
PUNTO DE INFLAMACIÓN		ISO 2592	°C	≥235	≥235	≥235	≥235	≥220
			Durabilidad - Resistencia al envejecimiento					
CAMBIO DE MASA		12607-1	%	≤0,8	≤0,8	≤1,0	≤1,0	≤1,0
PENETRACIÓN RETENIDA		1426	%	≥60	≥60	≥60	≥60	≥60
INCREMENTO DEL PUNTO DE REBLANDECIMIENTO		1427	°C	≤8	≤8	≤10	≤10	≤10
DISMINUCIÓN DEL PUNTO DE REBLANDECIMIENTO		1427	°C	≤5	≤5	≤5	≤5	≤5

Tabla 3.4 - Requisitos de los betunes modificados con polímeros

### 3.4 Granulometría

Para definir la cantidad (gramos) de material a emplear, hay que calcular el peso total de la probeta para que, con la granulometría predefinida que teníamos, logremos obtener unas probetas de 4cm y de 6cm para ambas mezclas. Finalmente, después de haber realizado varias pruebas para definir estos pesos totales, pudimos determinar que para lograr 4cm deberíamos usar 800g de material, mientras que para la de 6cm debíamos usar 1100g de material.

Los cálculos del peso granulométrico para cada muestra resultaron los siguientes:

Tamiz	% Pasa	%Retenido	Peso retenido (g)	Peso acumulado (g)	Peso total (g)
<b>22</b>	100	—	—	—	800
<b>16</b>	95	5%	40	40	
<b>8</b>	67,5	27,5%	220	260	
<b>4</b>	42,5	25,0%	200	460	
<b>2</b>	31	11,5%	92	552	
<b>0,5</b>	16	15%	120	672	
<b>0,25</b>	11	5%	40	712	
<b>0,063</b>	5	6%	48	760	

*Tabla 3.5 - Tabla granulométrica AC-16S 4cm*

Tamiz	% Pasa	%Retenido	Peso retenido (g)	Peso acumulado (g)	Peso total (g)
<b>22</b>	100	—	—	—	1100
<b>16</b>	95	5%	55	55	
<b>8</b>	67,5	27,5%	302,5	357,5	
<b>4</b>	42,5	25,0%	275	632,5	
<b>2</b>	31	11,5%	126,5	759	
<b>0,5</b>	16	15%	165	924	
<b>0,25</b>	11	5%	55	979	
<b>0,063</b>	5	6%	66	1045	

*Tabla 3.6 - Tabla granulométrica AC-16S 6cm*

<b>Tamiz</b>	<b>% Pasa</b>	<b>%Retenido</b>	<b>Peso retenido (g)</b>	<b>Peso acumulado (g)</b>	<b>Peso total (g)</b>
<b>32</b>	100	—	—	—	800
<b>22</b>	95	5%	40	40	
<b>16</b>	79	16%	128	168	
<b>8</b>	58	21%	168	336	
<b>2</b>	31	27%	216	552	
<b>0,5</b>	16	15%	120	672	
<b>0,25</b>	11	5%	40	712	
<b>0,063</b>	5	6%	48	760	

*Tabla 3.7 - Tabla granulométrica AC-22S 4cm*

<b>Tamiz</b>	<b>% Pasa</b>	<b>%Retenido</b>	<b>Peso retenido (g)</b>	<b>Peso acumulado (g)</b>	<b>Peso total (g)</b>
<b>32</b>	100	—	—	—	1100
<b>22</b>	95	5%	55	55	
<b>16</b>	79	16%	176	231	
<b>8</b>	58	21%	231	462	
<b>2</b>	31	27%	297	759	
<b>0,5</b>	16	15%	165	924	
<b>0,25</b>	11	5%	55	979	
<b>0,063</b>	5	6%	66	1045	

*Tabla 3.8 - Tabla granulométrica AC-22S 6cm*

Seguidamente, se necesita saber la cantidad de betún que usaremos para cada mezcla. Según el enunciado, tenemos un 4,75% de betún sobre mezcla, y un 4,98% de betún sobre árido, lo que nos resulta un total de 39,8g de betún para las probetas de 4cm y 54,7g de betún para las de 6cm.

### 3.5 Fabricación

#### 3.5.1 Tamizado de los áridos gruesos y finos

Para la preparación de los áridos deberemos dividirlos por tamaños, según la granulometría requerida. Para dividirlos usaremos una tamizadora mecánica vibratoria con tamices regidos por la UNE.



*Ilustración 3.2 - Tamizadora*

Pondremos los tamices en la tamizadora, se activa y se va vertiendo en la parte superior la mezcla de áridos. Con la vibración producida por la tamizadora, los áridos más pequeños van cayendo hasta su correspondiente tamiz, quedando atrapados en el tamiz con una luz menor a su diámetro. Una vez los tenemos divididos en sus correspondientes tamices los separamos por capazos.



*Ilustración 3.3 - Capazos divididos por tamaño de árido*

Debemos tener en cuenta que el árido retenido en el tamiz 0,063mm se considera que está “sucio”, ya que, al ser un tamiz tan fino y un grano de un diámetro tan reducido, no puede tamizarse completamente con la tamizadora vibratoria entre otras cosas porque se dispersaría. Así que procedemos a hacer el lavado de dicha muestra. Se coloca en un tamiz, en este caso circular, y se limpia con agua. El agua se lleva las partículas más finas y las que pasan el tamiz 0,063mm mientras que las partículas que nos interesan se quedan retenidas en este tamiz.



*Ilustración 3.4 - Limpieza fino*

Posteriormente, para eliminar el agua del árido más fino, deberemos secarlo mediante unas estufas.

### 3.5.2 Preparación de los áridos

Una vez tenemos los áridos separados y clasificados según su granulometría, deberemos pesar la cantidad de árido que necesitamos en cada muestra (rigiéndonos por la granulometría calculada anteriormente). Para realizarlo, cogemos una bandeja de metal, la ponemos encima de la báscula debidamente calibrada y tarada, vamos añadiendo el peso exacto de material empezando por el árido más grueso y terminando por el más fino, a excepción del filler, que lo colocaremos a parte en vasitos de plástico.



*Ilustración 3.5 - Áridos preparados en bandejas*

Para saber la cantidad exacta de filler necesaria en cada mezcla, debemos recurrir a las tablas granulométricas calculadas con anterioridad, coger el peso total de la muestra y restárselo al peso acumulado final de los áridos, de esta manera obtenemos los siguientes pesos de filler:

<b>AC-16S (peso total = 800 gramos)</b>	40 gramos
<b>AC-16S (peso total = 1100 gramos)</b>	55 gramos
<b>AC-22S (peso total = 800 gramos)</b>	40 gramos
<b>AC-22S (peso total = 1100 gramos)</b>	55 gramos

*Tabla 3.9 - Pesos filler*

Un dato a tener en cuenta es que se debe trabajar con el árido seco, por lo que, para asegurar su deshidratación, si se requiere por el estado del árido, éste se puede poner durante 24 horas en una estufa hermética a 100°C de temperatura, para asegurarnos que no haya alteraciones en el peso, es decir, que el agua no interfiera y estemos pesando agua en lugar de árido.



### **2.5.3 Fabricación de la mezcla bituminosa**

Cuando tenemos todos los áridos pesados y separados por bandejas (una bandeja equivale a una probeta), debemos poner las bandejas por lo menos 4 horas antes de su fabricación en un horno a una temperatura de 160°C. El filler no lo ponemos dentro del horno para evitar daños a causa de su finura y las altas temperaturas del horno.

Por otro lado, también debemos poner el betún en el horno 2 horas antes, pero vigilando que no sobrepase las 4 horas para evitar procesos de envejecimiento muy elevados. Así mismo, los moldes cilíndricos que usaremos posteriormente para la fabricación de probetas, también deben estar en el horno para igualar temperaturas en el momento de fabricación.

En resumen, todo el material que usaremos para la fabricación, debe estar a una temperatura de unos 160°C. Ésta será la temperatura de fabricación.

Antes de empezar a fabricar, prepararemos 32 papeles circulares (2 por probeta), con un diámetro igual al de los moldes que emplearemos. Se usan para colocarlos en la base de la probeta antes de verter la mezcla, y en la parte superior de la probeta una vez vertida la mezcla, así en el proceso de compactación usando el ensayo Marshall evitamos que la muestra se estropee.

En primer lugar, con las planchas y los utensilios para fabricar calientes, cogeremos una de las bandejas del horno y verteremos todos los áridos que contiene en un recipiente metálico en forma de olla, dónde mezclaremos un poco para homogeneizar la mezcla de los áridos.

En segundo lugar, pondremos el recipiente metálico encima de la báscula y taramos. Añadimos la cantidad de betún que requiere la muestra y volvemos a la plancha, dónde una vez mezclado todo el betún con los áridos, hay que tener en cuenta que los áridos estén completamente envueltos de betún, añadimos el filler que tenemos en los vasitos de plástico preparados previamente. Volvemos a mezclar bien para homogeneizar toda la muestra, fijándonos en que el betún envuelva y cree una película alrededor de todos los materiales. Una vez esté todo bien mezclado iremos controlando con un termómetro la temperatura de la mezcla, la cual debe estar alrededor de los 155°C. Cuando obtengamos dicha temperatura en la mezcla, colocaremos una base circular, el papel circular descrito anteriormente y el molde cilíndrico para verter toda la mezcla en su interior. En la cima pondremos otro papel circular.



*Ilustración 3.6 - Proceso adición betún y filler en la fabricación*



Seguidamente, sin dejar perder mucha temperatura, pondremos la muestra en la compactadora Marshall, dónde compactará la muestra mediante 75 golpes en una cara, teniendo que girar la muestra para compactar por la otra cara con otros 75 golpes, tal y como indica la normativa UNE-EN 12697-30.



*Ilustración 3.7 - Máquina Marshall*

Finalmente, una vez tenemos las 16 probetas fabricadas, las enumeramos y las dejamos enfriar durante un día para posteriormente desmoldarlas usando un gato hidráulico. Cuando las hayamos desmoldado, volveremos a marcarlas y a enumerarlas.

### ***3.6 Contenido de huecos y densidad máxima***

Para poder determinar el contenido de huecos existente en cada probeta y su densidad aparente y máxima, hay que realizar una serie de pasos previos y cálculos, que son los que describiremos a continuación.

Cuando ya tenemos las probetas endurecidas y desmoldadas, mediremos su altura usando un pie de rey analógico. Para coger este dato es necesario realizar 3 mediciones equidistantes entre ellas, por lo que estarán divididas mediante un ángulo de 60°. A continuación, pesaremos cada probeta en la báscula.

Una vez hayamos hecho este proceso, nos quedará determinar el peso de la probeta sumergida en agua y el de la probeta con la superficie saturada seca. Para saber la masa de la probeta sumergida, deberemos ponerlas en un recipiente con agua, poniendo una malla en la base interior del recipiente para asegurarnos de que el agua está en contacto directo con todas las caras de las probetas. Debemos dejarlas una hora sumergidas. Seguidamente, mediante una plataforma sumergida en agua y enganchada debidamente a la báscula, pesaremos la probeta sumergida, la sacaremos y le pasaremos suavemente un trapo húmedo por todas las caras, para inducir la saturación de agua en la superficie de la probeta en seco, y la pesaremos. Todos estos datos son de especial interés para la obtención de la densidad aparente, que viene definida por la siguiente fórmula:

$$\rho_{ap} = \frac{m_1}{m_3 - m_2} \cdot \rho_w$$

Donde:

$\rho_{ap}$ : densidad aparente ( $\text{g/cm}^3$ )

$m_1$ : masa probeta seca (g)

$m_2$ : masa probeta sumergida en agua (g)

$m_3$ : masa probeta superficie saturada seca (g)

$\rho_w$ : densidad del agua ( $\text{g/cm}^3$ )

Una vez obtenida la densidad aparente, deberemos calcular la densidad máxima. Para hacerlo necesitaremos haber creado una mezcla más para la mezcla AC-16S y otra para la AC-22S, sin importar el peso, haciendo el mismo proceso, pero sin llegar ponerlo en la probeta ni compactarlo, simplemente lo dejaremos sobre una bandeja de metal hasta que se enfríe. Una vez enfriada, procederemos a desgranar manualmente la mezcla sin poder dejar áridos mayores de 3mm pegados entre sí (condición regida según la Norma Española UNE-EN 1297-5:2003+A1).



*Ilustración 3.8 - Muestra desgranada*

Cuando hayamos concluido la desgranación, deberemos poner el 50% de la muestra en un picnómetro y el otro 50% de la muestra en otro picnómetro. Estos picnómetros habrán sido pesados previamente. Volveremos a pesar cada picnómetro, pero esta vez con su muestra en el interior y seguidamente les añadiremos agua destilada para dejarlos durante un mínimo de 30 minutos en un baño de agua a 25°C.

Durante este baño, cada picnómetro debe estar 15 minutos conectado a una máquina de vacío, que lo que hace es extraer el aire que queda en el interior atrapado entre la mezcla y el agua. Cada 5 minutos deberemos ir agitando el picnómetro para ayudar a la extracción de dicho aire.



*Ilustración 3.9 - Bañera con agua destilada*

Al completar como mínimo los 30 minutos que deben estar los picnómetros en la bañera, rellenaremos con más agua destilada lo que reste hasta llegar a la marca indicada en el picnómetro, asegurándonos de que no quede ningún resto de agua en la parte que debería estar seca, y volvemos a pesarlos.

Los datos obtenidos durante este proceso nos servirán para determinar la densidad máxima, definida como:

$$\rho_{\max} = \frac{m_2 - m_1}{V_p - \left(\frac{m_3 - m_2}{\rho_w}\right)}$$

Donde:

$\rho_{\max}$ : densidad máxima (g/cm<sup>3</sup>)

$m_1$ : masa del picnómetro (g)

$m_2$ : masa del picnómetro y muestra de la mezcla (g)

$m_3$ : masa del picnómetro, muestra de la mezcla y agua destilada (g)

$V_p$ : volumen del picnómetro (cm<sup>3</sup>)

$\rho_w$ : densidad del agua (g/cm<sup>3</sup>)

Ahora que ya tenemos tanto la densidad aparente como la densidad máxima, podemos obtener el porcentaje de huecos (%H) mediante la fórmula regida por la Norma Española UNE-EN 12697-8, definida como:

$$\%H = \frac{\rho_{\max} - \rho_{ap}}{\rho_{\max}} \cdot 100$$

Tal y como hemos indicado anteriormente, este proceso debe realizarse para la mezcla AC-16S y para la mezcla AC-22S.

### **3.7 Ensayo Fénix**

#### ***3.7.1 Generalidades***

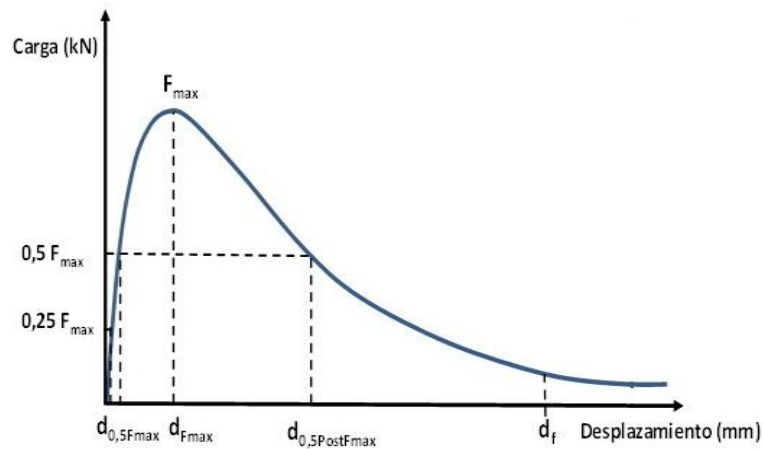
El Ensayo Fénix es un ensayo que se realiza a tracción el cual ha sido desarrollado por el Laboratorio de Caminos de la Universidad Politécnica de Cataluña. Su objeto es el análisis de la resistencia a fisuración de las mezclas bituminosas mediante el cálculo de la energía disipada en la creación de la fisura.

Es valorado positivamente este ensayo por la capacidad que aporta de simular los efectos producidos por las sollicitaciones del tráfico y las medioambientales.

#### ***3.7.2 Descripción***

Para la realización del ensayo es necesaria la fabricación u obtención de probetas cilíndricas, cortadas por la mitad, con una muesca de 6mm de profundidad justo en el eje central. Las caras planas de la media probeta van debidamente pegadas a unas placas de metal que irán sujetas a los anclajes de la prensa. El ensayo se realiza con cargas tensionales constantes de 1mm/min y la temperatura deseada.

De este proceso obtenemos una gráfica con una curva Carga-Desplazamiento como la siguiente:



*Ilustración 3.10 - Curva Carga-Desplazamiento*

Hay un equipo que registra los datos a medida que el ensayo va avanzando, y éste termina cuando el desplazamiento es superior a 4mm y la fuerza transmitida es igual o menor a 5 kN. Los parámetros mecánicos que extraemos son los siguientes:

- La carga máxima a tracción ( $F_{\max}$ ) registrada en el ensayo de tracción directa (kN)
- El desplazamiento a carga máxima ( $\Delta F_{\max}$ ) realizado por el pistón una vez registrada la carga máxima a tracción (mm)
- La resistencia a tracción ( $R_T$ ) que es la relación entre la carga máxima ( $F_{\max}$ ) y el área de fractura (MPa):

$$R_T = \frac{1000 \cdot F_{\max}}{h \cdot l}$$

Donde:

$R_T$ : resistencia a tracción (MPa)

$F_{\max}$ : Carga máxima a tracción (kN)

$h$ : espesor de la probeta (m)

$l$ : longitud inicial del radio reducido (m)

- La energía de fractura ( $G_F$ ) es el trabajo disipado en el proceso de fisuración entre el área de fractura perpendicular a la fuerza aplicada:

$$G_F = \frac{W_D}{h \cdot l}$$

Donde:

$G_F$ : energía de fractura por unidad de superficie en el proceso de fisuración ( $J/m^2$ )

$W_D$ : Trabajo realizado en el proceso de fisuración (área bajo la curva Carga-Desplazamiento) ( $kN \cdot mm$ )

$h$ : espesor de la probeta (m)

$l$ : longitud inicial del radio reducido (m)

- Desplazamiento al 50%  $F_{max}$  postpico ( $d_{0,5 PM}$ ) (mm) es el registrado por la mezcla una vez que el valor de la carga ha disminuido a la mitad de la carga máxima. Es el parámetro principal para poder determinar la deformación sufrida. Como menor sea, más frágil es la muestra.
- Índice de tenacidad ( $I_T$ ) es la energía disipada en el proceso de ablandamiento multiplicada por un factor de fragilidad. Dicho factor se corresponde con el desplazamiento realizado desde la carga máxima hasta que la carga cae a la mitad de su valor máximo. El  $I_T$  está hecho para evaluar la tenacidad de la mezcla. A mayor valor del índice, mayor ductilidad y tenacidad de la muestra.

$$I_T = \frac{W_D - W_{F_{max}}}{h \cdot l} \cdot (d_{0,5 PM} - \Delta F_{max})$$

Donde:

$I_T$ : índice de tenacidad ( $J/mm$ )

$W_D$ : trabajo realizado en el proceso de fisuración (área bajo la curva Carga-Desplazamiento) ( $kN \cdot mm$ )

$W_{F_{max}}$ : trabajo realizado hasta carga máxima ( $kN \cdot mm$ )

$h$ : espesor de la probeta (m)

$l$ : longitud inicial del radio reducido (m)

$d_{0,5 PM}$ : desplazamiento a  $\frac{1}{2} F_{max}$  postpico (mm)

$\Delta F_{max}$ : desplazamiento a  $F_{max}$  (mm)

- Índice de rigidez (IRT) es la relación entre el valor medio de la carga máxima y el desplazamiento a ese valor de carga antes de la carga máxima. Cuanto menor es mayor flexibilidad tiene la mezcla:

$$IRT = \frac{F_{50} - F_{25}}{d_{50} - d_{25}} \cdot \frac{1000}{h \cdot l}$$

Donde:

IRT: índice de rigidez a tracción (MPa/mm)

$F_{max}$ : carga máxima a tracción (kN)

$\Delta_m$ : desplazamiento antes de la carga máxima a  $\frac{1}{2} F_{max}$  (mm)

h: espesor de la probeta (m)

l: longitud inicial del radio reducido (m)

### 3.7.3 Preparación de las probetas

Cuando tenemos las probetas fabricadas y ya hemos hecho los ensayos para determinar el contenido de huecos y la densidad máxima, procedemos a cortarlas por la mitad, realizando un corte de 6mm en la cara plana que resulta de dicho corte. Posteriormente, con el pie de rey mediremos la distancia que existe del centro de la probeta a su extremo, y desde el corte de profundidad hasta el extremo, consiguiendo de esta manera la distancia de ranura.



*Ilustración 3.11 - Probetas ensayo Fénix*

A continuación, deberemos preparar 32 placas de acero (2 por cada mitad de probeta), las limaremos con papel de vidrio y las terminaremos de limpiar con un trapo y disolvente, de esta manera eliminamos cualquier resto de suciedad que pueda tener la placa y asegurar una óptima adherencia.

Una vez limpias, prepararemos la resina para el pegado de las placas a las probetas. El proceso a seguir concretamente para dicha resina consiste en hacer una proporción de 3 partes de resina por 1 parte de retardador. Este retardador es necesario para que dé tiempo a aplicarlo a todas las probetas antes de que empiece a endurecerse.

Para asegurarnos de que queden pegadas correctamente, es decir, bien alineadas, sin posibilidad de torceduras o de un espacio excesivo o desigual entre placas y el centro de la probeta, usaremos placas de hierro a modo de guía, colocaremos las placas en posición y, untando la resina en la cara plana de las probetas, las pondremos encima de las placas hasta que se sequen. El tiempo total de secado es de 48 horas: 24 horas a temperatura ambiente más 24 horas en la nevera para lograr la temperatura deseada para el ensayo (en nuestro caso las caras A irán a una nevera de 20°C y las caras B a una nevera de 5°C).



*Ilustración 3.12 - Colocación para pegado y secado probetas Fénix*

#### **3.7.4 Ejecución del Ensayo Fénix**

Cumplido el tiempo de secado y de acondicionamiento en las neveras, ya podremos realizar el ensayo Fénix.

Para ello tenemos que haber regulado previamente la cámara del ensayo a la temperatura a la que queremos realizar el ensayo. Una vez lo tenemos, cogemos una de las probetas y la fijamos en los soportes de la prensa, quedando en una posición vertical. Para que las placas queden tensas, aplicaremos una fuerza de tensión previa de 3kN. Cuando ya está colocada, cerraremos la cámara, volveremos a revisar que la temperatura se ajuste a los 20°C o los 5°C requeridos en nuestro ensayo y lo iniciaremos sometiendo la probeta a un esfuerzo de tracción de velocidad constante 1mm/min.

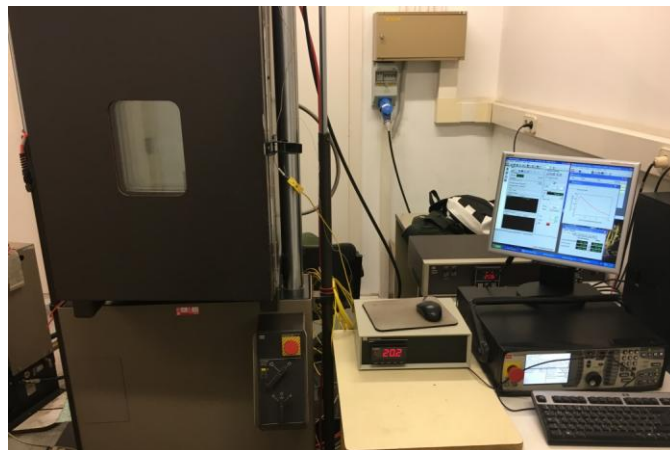




*Ilustración 3.13 – Antes y después del ensayo Fénix*

El equipo irá computando y registrando los datos del ensayo, para posteriormente poder hacer el cálculo de los parámetros y el estudio de sensibilidad.

Como hemos comentado con anterioridad, el ensayo finaliza al alcanzar una deformación de 4mm y una carga mínima de 5 kN.



*Ilustración 3.14 - Equipo Fénix*

Para terminar, simplemente nos quedará limpiar las placas para su posterior uso. Pondremos las probetas ya ensayadas en la plancha para que de esta manera la resina se reblandezca y sea más fácil de separar. Las probetas despegadas se desechan, mientras que las placas las limpiamos bien y las dejamos enfriar para su posterior uso.

## **CAPÍTULO 4. RESULTADOS**

### **4.1 Introducción**

En total tendremos que realizar 8 ensayos de 16 medias probetas cada uno, dónde las caras A de cada serie se corresponden con el ensayo a temperatura igual a 20°C, y las caras B se corresponden a las ensayadas a 5°C.

Una vez obtenidos todos los resultados, las curvas Carga-Desplazamiento y con los datos registrados en el equipo, habremos terminado el estudio experimental dando paso al cálculo estadístico para medir la sensibilidad del Ensayo Fénix. El estudio de los resultados obtenidos se hará en función del tamaño máximo de árido y de la altura de la probeta, mientras que las variaciones de temperatura no se estudiarán ni se compararán entre ellas a causa de la evidente diferencia en los resultados de las probetas ensayadas.

Diferenciaremos 4 grandes grupos de mezclas:

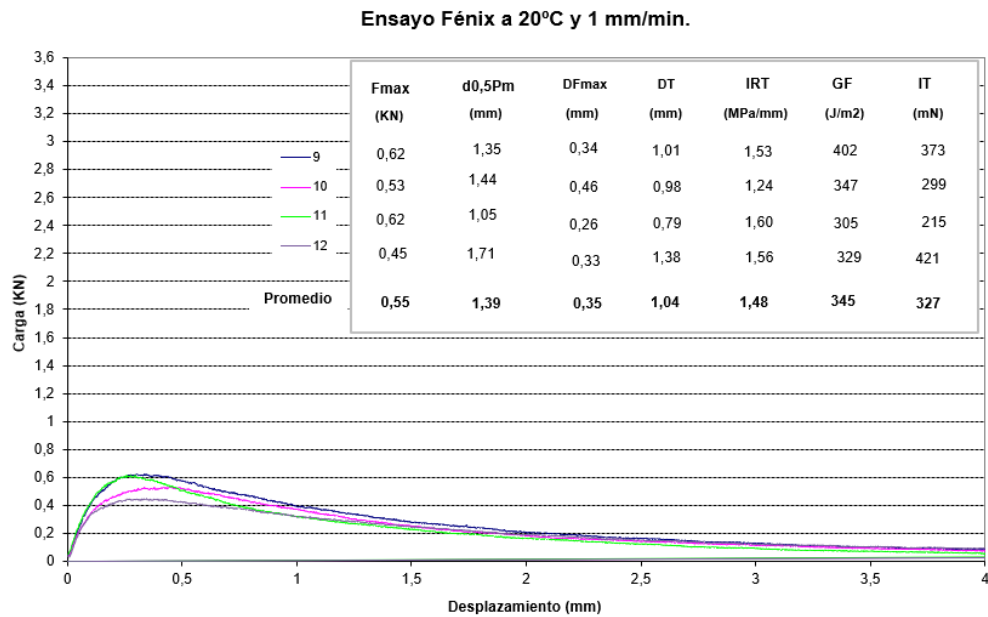
- AC-16S 4cm
- AC-16S 6cm
- AC-22S 4cm
- AC-22S 6cm

Los cuales están subdivididos cada uno en caras A y B.

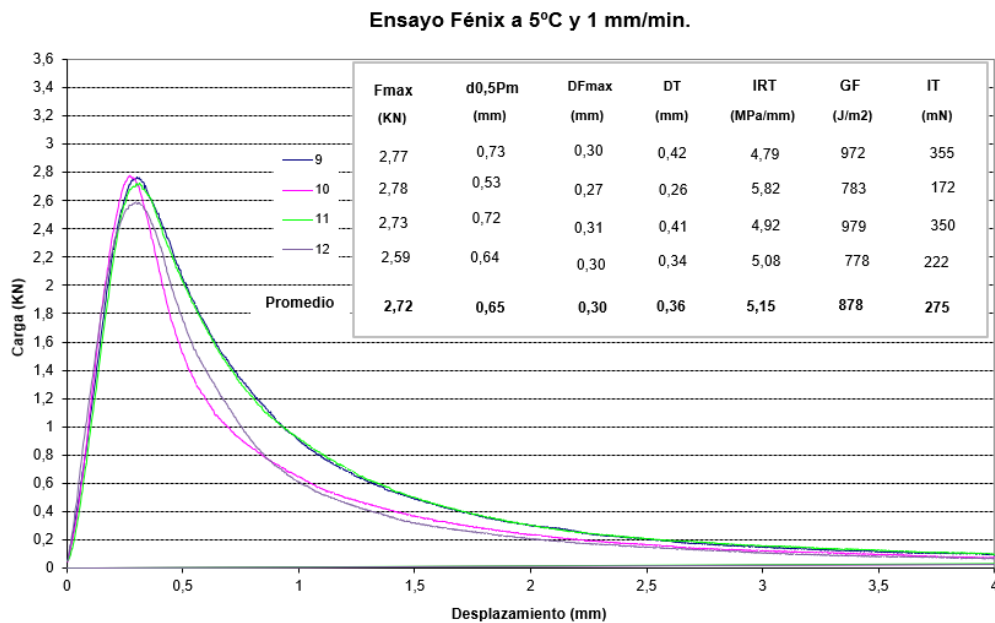
### **4.2 Procesamiento de datos**

Para procesar los datos obtenidos en la realización del ensayo, pasaremos todos los datos registrados por el equipo a una plantilla Excel, la cual ha sido diseñada por el equipo desarrollador del ensayo Fénix. Dicha plantilla nos permite analizar las probetas de cuatro en cuatro, proporcionándonos la capacidad de calcular los parámetros IRT, d<sub>0,5</sub> PM, GF y RT, así como graficar las curvas Carga-Desplazamiento.

Aquí podemos comparar el resultado de las curvas C-D en el mismo tipo de muestra (AC-22S 6cm) pero a diferentes temperaturas, la primera a 20°C y la segunda a 5°C. Se han cogido como ejemplo las probetas número 9 hasta la número 12 de dicha serie:



*Ilustración 4.1 - Gráfica C-D AC-22S 20°C 6cm, probetas 9-12*



*Ilustración 4.2 - Gráfica C-D AC-22S 5°C 6cm, probetas 9-12*

Cuando tengamos todos los datos introducidos en la plantilla Excel, diseñaremos una tabla resumen para juntar los datos obtenidos en cada serie ensayada.

La tabla que tenemos a continuación es un ejemplo de tabla resumen de la serie AC-22S 6cm a 20°C, donde podemos ver rápidamente el valor de los parámetros que posteriormente nos servirán para realizar los test estadísticos.

<i>Nº probeta</i>	<i>H%</i>	<i>IRT/Af</i>	<i>GF</i>	<i>d0,5Pm</i>
1	3,5586	1,4802	323,2769	1,3208
2	3,1667	1,7147	438,9811	1,4774
3	3,3627	1,6370	369,8347	1,4591
4	3,4411	2,0859	387,0445	1,3536
5	3,5586	1,7577	286,6456	0,9892
6	3,0884	1,8539	433,9329	1,4538
7	3,6762	2,2710	304,5977	1,0344
8	2,8924	1,5398	391,0304	1,6845
9	3,6762	1,5256	401,6086	1,3496
10	3,2843	1,2384	346,5545	1,4411
11	3,8329	1,5959	304,7347	1,0493
12	3,5194	1,5627	328,6895	1,7141
13	3,4802	1,4659	335,3834	1,1902
14	3,4411	1,6439	355,9184	1,4096
15	3,8721	1,6666	286,7376	1,1606
16	3,4411	1,4898	403,1202	1,3909
<i>Media</i>	3,4557	1,6581	356,1307	1,3424
<i>Desviación Estándar (Sr)</i>	0,26	0,249	49,6	0,213
<i>Límite de repetibilidad ( r )</i>	0,728	0,6972	138,88	0,5964

*Tabla 4.1 - Tabla resumen AC-22S 20°C 6cm*

Una vez tengamos las tablas realizadas, será momento de realizar los test estadísticos. Para su elaboración usaremos el software denominado MiniTab. Gracias a los resultados estadísticos que obtendremos mediante este software, determinaremos la normalidad de las probetas, es decir, si existen valores atípicos en alguna de ellas, así como nos permitirá ver las diferencias existentes en las probetas según el cambio de variables al cual han sido sometidas para así comprobar si el ensayo Fénix es sensible o no frente estos cambios.

### 4.3 Estudio de valores medios y coeficiente de variación

En primer lugar, se presentan los valores medios de los resultados obtenidos para cada uno de los parámetros calculados. En este apartado, hemos añadido el parámetro de Resistencia a Tracción (RT) para tratar de indagar más en el estudio:

Parámetro Fénix	Temperatura	20°C				5°C			
	Mezcla	AC22		AC16		AC22		AC16	
	Altura	4 cm	6 cm	4 cm	6 cm	4 cm	6 cm	4 cm	6 cm
Resistencia a Tracción	RT	0,2	0,2	0,2	0,2	1,1	1,0	1,0	1,0
Índice Rigidez a Tracción	IRT/Af	1,9	1,7	1,5	1,4	5,9	5,0	5,8	4,9
Energía de Fractura	GF	309	356	333	349	752	779	799	757
Desplazamiento al 50% carga postpico	d0,5Pm	1,3	1,3	1,5	1,4	0,5	0,6	0,6	0,6

*Tabla 4.2 - Valores medios de los parámetros Fénix*

Como se puede observar, en valores promedios, no se observan diferencias por el cambio de altura de probeta ni por el tamaño máximo de los áridos en las mezclas. Esto conduce a un análisis más profundo con objeto de evaluar cada uno de los parámetros empleando técnicas estadísticas.

Asimismo, se presentan en la siguiente tabla los coeficientes de variación correspondientes a cada parámetro:

Parámetro Fénix	Temperatura	20°C				5°C			
	Mezcla	AC22		AC16		AC22		AC16	
	Altura	4 cm	6 cm	4 cm	6 cm	4 cm	6 cm	4 cm	6 cm
Resistencia a Tracción	RT	6,8	10,0	7,1	7,4	12,3	6,5	7,7	7,1
Índice Rigidez a Tracción	IRT/Af	10,0	15,0	30,6	18,1	14,6	8,8	9,1	9,9
Energía de Fractura	GF	10,2	13,9	19,5	6,4	19,9	16,8	9,6	15,1
Desplazamiento al 50% carga postpico	d0,5Pm	11,9	15,8	17,5	9,4	16,4	17,7	9,6	11,6

*Tabla 4.3 - Coeficientes de variación de los parámetros Fénix*

Analizándolos, se puede apreciar que los mayores valores obtenidos oscilan entre 9,6% y 19,9%. Si bien, excepcionalmente, hay un valor de 30,6%, el resto queda por debajo de 20%. Estos valores son considerados aceptables para ensayos sobre mezclas bituminosas. <sup>[6]</sup>

## 4.4 Test estadísticos

En este apartado explicaremos los test estadísticos realizados sobre los datos y parámetros obtenidos con anterioridad.

### 4.4.1 Test de Grubbs'

Puesto que la presencia de un valor anómalo es capaz de alterar totalmente el resultado final de un estudio, es conveniente poder detectar estos valores y eliminarlos. Para esto es usado el Test de Grubbs', encuentra los valores discrepantes o atípicos de una población o muestra. Su base consiste en presuponer una población normal y plantea dos hipótesis para detectar los elementos residuales:

- $H_0$ : no hay datos atípicos en la muestra
- $H_1$ : hay al menos un dato atípico en la muestra

La fórmula estadística de dicho test es:

$$G = \frac{\max |x_i - \bar{x}|}{s}$$

Donde:

S: desviación típica de la muestra

$\bar{x}$ : media de la muestra

Si tomamos como referencia la distribución  $t_{n-2}$  de Student con  $(n-2)$  grados de libertad (siendo  $n$  el tamaño de la muestra), podemos obtener aproximadamente la región crítica de este contraste.

De esta manera, definiendo  $k$  como:

$$\Pr \{t_{n-2} > k\} = \frac{\alpha}{2n}$$

Donde:

$\alpha=0,05$  (nivel de significación)

Aceptaremos la hipótesis alternativa de  $H_1$  de existencia de dato atípico si  $G$  excede de cierto valor crítico, siendo  $G$ :

$$G > \frac{n-1}{\sqrt{n}} \sqrt{\frac{k^2}{n-2+k^2}}$$

#### **4.4.2 Descripción estadística**

La descripción estadística se corresponde a un resumen de distintos parámetros estadísticos que nos permiten realizar un análisis con mayor criterio. Dentro de esta descripción se incluyen la media, la desviación estándar, el coeficiente de variación y los intervalos de confianza a un 95%.

#### **4.4.3 Límite de repetibilidad**

El parámetro denominado de repetibilidad puede definirse cualitativamente y cuantitativamente. Cualitativamente hablando se corresponde con el grado de concordancia entre resultados obtenidos por la aplicación normal y correcta del mismo método, con el mismo material de ensayo, en las mismas condiciones y en un corto período de tiempo (con un mismo operador, mismo equipo y mismo laboratorio). Mientras que cuantitativamente hablando es el valor igual o inferior a aquél que esperas que se sitúe con una probabilidad del 95% la diferencia absoluta entre dos resultados individuales obtenidos de la misma manera que anteriormente.

El límite de repetibilidad es 2,8 veces la desviación estándar.

#### **4.4.4 Test de Kolmogorov-Smirnov**

El test de Kolmogorov-Smirnov, también denominado test de normalidad, es un test no paramétrico que determina el ajuste de dos distribuciones de probabilidad entre sí. Es un test que presenta mucha más sensibilidad a los valores más cercanos a la mediana que a los que están en los extremos de la distribución.

Se define como:

$$F_n(x) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \begin{cases} 1 & \text{si } y_i \leq x, \\ 0 & \text{alternativa.} \end{cases}$$

Para dos colas el estadístico viene dado por:

$$D_n^+ = \max(F_n(x) - F(x))$$

$$D_n^- = \max(F(x) - F_n(x))$$

Donde:

$F(x)$ : distribución presentada como hipótesis

El test de Normalidad es una de las condiciones que se analizan antes de realizar un análisis de varianzas.

#### **4.4.5 Test de Levene**

El test de Levene, también denominado test de varianzas iguales, es una prueba estadística que evalúa la igualdad de las varianzas para una variable calculada para dos o más grupos. Este test pone en duda la hipótesis nula de que las varianzas poblacionales son iguales. Si el p-value resultante del test es inferior a un cierto nivel de significación ( $\alpha=0,05$ ), es poco probable que las diferencias obtenidas en las variaciones de la muestra se hayan producido sobre la base de un muestreo aleatorio de una población con varianzas iguales.

Dicho test es muy usado antes de una comparación de medias. Cuando este test muestra significación, debe cambiarse a pruebas no paramétricas.

Se define como: <sup>[8]</sup>

$$W = \frac{(N - k)}{(k - 1)} \frac{\sum_{i=1}^k N_i (Z_{i.} - Z_{..})^2}{\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{N_i} (Z_{ij} - Z_{i.})^2}$$

Donde:

W: resultado del test de Levene

N: número total de casos en todos los grupos

$N_i$ : número de casos en el grupo i



k: número de diferentes grupos a los que pertenecen los casos muestreados

$$Z_{ij} = \begin{cases} |Y_{ij} - \bar{Y}_{i.}|, & \bar{Y}_{i.} \text{ es la media del "i" esimo grupo} \\ |Y_{ij} - \tilde{Y}_{i.}|, & \tilde{Y}_{i.} \text{ es la mediana del "i" esimo grupo} \end{cases}$$

$Y_{ij}$ : valor de la variable medida por jésimo caso del iésimo grupo

#### 4.4.6 Test de T-Student

El test de T-Student es usado para la determinación de las posibles diferencias significativas que puede haber entre las medias de dos grupos, es decir, se usa para la comparación de dos medias de poblaciones independientes y normales.

Antes de aplicarlo se debe haber comprobado si los datos a analizar siguen una distribución normal, para ello hará falta haber realizado un test de bondad de ajuste como la prueba de Kolmogorov.

Disponemos de dos versiones de este test: para poblaciones con varianzas iguales y para poblaciones que no las asumen. Deberemos realizar un test de comparación de varianzas para saber qué versión de las dos usaremos. El test formulará dos hipótesis:

- $H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$
- $H_1: \mu_1 - \mu_2 \neq 0$

Para poder saber qué hipótesis será la que consideraremos como correcta, debemos calcular el estadístico de contraste para varianzas iguales, que está definido como:

$$t = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\sqrt{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}}} = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\sqrt{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}}}$$

Con grados de libertad:

$$gl = (n_1 - 1) + (n_2 - 1) = (n_1 + n_2 - 2)$$

Y, posteriormente, el estadístico de contraste para varianzas diferentes, que está definido como:

$$t = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\sqrt{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}}} = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\sqrt{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}}}$$

Con grados de libertad:

$$gl = \frac{[EE(\bar{x}_1 - \bar{x}_2)]^k}{\frac{1}{n_1 - 1} [EE(\bar{x}_1)]^k + \frac{1}{n_2 - 1} [EE(\bar{x}_2)]^k}$$

Los valores obtenidos de los cálculos estadísticos del test T-Student son viables para usarse en pruebas de una o dos colas. Una vez realizado el cálculo estadístico de contraste, buscamos el p-value asociado en la tabla de valores de distribución. Si el valor estadístico que extraemos de este cálculo es menor al límite marcado como significancia estadística  $\alpha$ , diremos que la hipótesis es nula, rechazándola y cogiendo como buena la hipótesis alternativa.

Normalmente dichos valores de significancia oscilan entre 0,10; 0,05 ó 0,01.

#### 4.5 Análisis de los resultados estadísticos

Los resultados extraídos de los cálculos estadísticos están expuestos en los Anejos.

De estos resultados, con el test de Grubbs' realizado, podemos despreciar ciertas probetas de cada serie por sus valores atípicos, los cuales interferirían en el resultado final del ensayo aportándonos conclusiones no reales.

A continuación, podemos ver mediante tablas resumen los parámetros estadísticos obtenidos para completar el análisis de resultados. Dichos parámetros son la media, la desviación estándar (Sr) y el límite de repetibilidad (r).

- AC-16S 4cm 5°C: despreciamos la probeta 12.

	H%	IRT/Af	GF	d0,5Pm
<b>Media</b>	3,445	5,817	800	0,6297
<b>Desviación Estándar (Sr)</b>	0,346	0,528	76,4	0,0607
<b>Límite de repetibilidad ( r )</b>	0,9688	1,4784	213,92	0,16996

Tabla 4.4 - Parámetros AC-16S 4cm 5°C

- AC-16S 6cm 5°C: despreciamos la probeta 6.

	H%	IRT/Af	GF	d0,5Pm
<b>Media</b>	4,381	4,911	757	0,5964
<b>Desviación Estándar (Sr)</b>	0,616	0,485	114	0,0692
<b>Límite de repetibilidad ( r )</b>	1,7248	1,358	319,2	0,1938

Tabla 4.5 - Parámetros AC-16S 6cm 5°C

- AC-16S 4cm 20°C: despreciamos la probeta 1.

	H%	IRT/Af	GF	d0,5Pm
<b>Media</b>	3,4683	1,4934	333	1,5089
<b>Desviación Estándar (Sr)</b>	0,338	0,456	64,8	0,264
<b>Límite de repetibilidad ( r )</b>	0,9464	1,2768	181,44	0,7392

*Tabla 4.6 - Parámetros AC-16S 4cm 20°C*

- AC-16S 6cm 20°C: despreciamos las probetas 2, 4 y 16.

	H%	IRT/Af	GF	d0,5Pm
<b>Media</b>	4,4949	1,3570	349	1,3568
<b>Desviación Estándar (Sr)</b>	0,567	0,245	22,4	0,127
<b>Límite de repetibilidad ( r )</b>	1,5876	0,686	62,72	0,3556

*Tabla 4.7 - Parámetros AC-16S 6cm 20°C*

- AC-22S 4cm 5°C: despreciamos la probeta 13.

	H%	IRT/Af	GF	d0,5Pm
<b>Media</b>	3,337	5,864	752	0,5488
<b>Desviación Estándar (Sr)</b>	0,32	0,854	150	0,0899
<b>Límite de repetibilidad ( r )</b>	0,896	2,3912	420	0,2517

*Tabla 4.8 - Parámetros AC-22S 4cm 5°C*

- AC-22S 6cm 5°C: despreciamos la probeta 7.

	H%	IRT/Af	GF	d0,5Pm
<b>Media</b>	3,441	5,008	779	0,587
<b>Desviación Estándar (Sr)</b>	0,262	0,441	131	0,104
<b>Límite de repetibilidad ( r )</b>	0,7336	1,2348	366,8	0,2912

*Tabla 4.9 - Parámetros AC-22S 6cm 5°C*

- AC-22S 4cm 20°C: despreciamos las probetas 1, 5 y 7.

	H%	IRT/Af	GF	d0,5Pm
<b>Media</b>	3,3265	1,8796	309	1,3057
<b>Desviación Estándar (Sr)</b>	0,335	0,188	31,7	0,156
<b>Límite de repetibilidad ( r )</b>	0,938	0,5264	88,76	0,4368

*Tabla 4.10 - Parámetros AC-22S 4cm 20°C*

- AC-22S 6cm 20°C: no despreciamos ninguna probeta.

	H%	IRT/Af	GF	d0,5Pm
<b>Media</b>	3,4557	1,6581	356	1,3424
<b>Desviación Estándar (Sr)</b>	0,26	0,249	49,6	0,213
<b>Límite de repetibilidad ( r )</b>	0,728	0,6972	138,88	0,5964

*Tabla 4.11 - Parámetros AC-22S 6cm 20°C*

## 4.6 Análisis de resultados según las variables

Una vez vistos los resultados estadísticos obtenidos en el apartado anterior, solamente resta analizar mediante comparación los resultados en función de cada una de las variables que dispone cada muestra.

Recordemos los parámetros a analizar de cada muestra: Huecos (H%), Índice de Rigidez a Tracción (IRT), Energía de Fractura (GF), Desplazamiento al 50% de la Carga Máxima Postpico (d0,5 PM).

Como ya habíamos comentado con anterioridad, la influencia de la temperatura no ha sido analizada ya que es un parámetro estudiado muy profundamente y con conocimiento de su influencia en la sensibilidad de los ensayos: hay numerosos estudios que demuestran que a medida que la temperatura aumenta, el IRT disminuye, mientras que el d0,5 PM puede aumentar. Además, esta influencia se puede ver a simple vista fijándonos en las gráficas Curva-Desplazamiento extraídas del equipo de medición del ensayo Fénix.

Por este hecho, a continuación, nos dedicaremos a analizar la sensibilidad del ensayo sobre la influencia de la altura de la probeta y del tamaño máximo de áridos.

### ***4.6.1 Influencia de la altura de la probeta***

Primero cogeremos la altura de las probetas como objeto de estudio y análisis. Hemos fabricado con dos alturas distintas de probeta, una de 4cm y la otra de 6cm, ensayando cada una de ellas a 5°C y a 20°C. De este modo el estudio se realiza comparando diferencias de altura, pero con el mismo tamaño máximo de árido y temperatura.

Primero veremos un resumen de los resultados extraídos mediante los cálculos estadísticos (con el test T-Student) y posteriormente analizaremos estos resultados para cada parámetro.

#### ***4.6.1.1 Resultados T-Student***

Se han elaborado unas tablas resumen para visualizar de una manera más sencilla y rápida los resultados finales del estudio estadístico p-value de diferente altura de probeta, sabiendo que dicho valor debe ser mayor a 0,05 para que el parámetro analizado no presente diferencias significativas a la variación de la altura de la probeta. Por el contrario, si el valor del p-value es menor a 0,05 diremos que sí que existen diferencias significativas entre las muestras comparadas.

Las tablas mostradas a continuación indican los valores mayores a 0,05 en verde y los menores en rojo:

- AC-16S 5°C: 4cm vs 6cm

AC-16S 5°C: 4cm vs 6cm				
	H (%)	IRT	GF	d0,5 PM
p-value	0,000	0,000	0,239	0,171

Tabla 4.12 - Resultados test T-Student AC-16S 5°C: 4cm vs 6cm

- AC-16S 20°C: 4cm vs 6cm

AC-16S 20°C: 4cm vs 6cm				
	H (%)	IRT	GF	d0,5 PM
p-value	0,000	0,327	0,395	0,061

Tabla 4.13 - Resultados test T-Student AC-16S 20°C: 4cm vs 6cm

- AC-22S 5°C: 4cm vs 6cm

AC-22S 5°C: 4cm vs 6cm				
	H (%)	IRT	GF	d0,5 PM
p-value	0,336	0,003	0,610	0,285

Tabla 4.14 - Resultados test T-Student AC-22S 5°C: 4cm vs 6cm

- AC-22S 20°C: 4cm vs 6cm

AC-22S 20°C: 4cm vs 6cm				
	H (%)	IRT	GF	d0,5 PM
p-value	0,252	0,013	0,006	0,609

Tabla 4.15 - Resultados test T-Student AC-22S 20°C: 4cm vs 6cm

Resumiremos las tablas anteriores en una general para una visualización más clara de las observaciones que realizaremos en los siguientes apartados:

4cm vs 6cm	Probeta	H%	IRT	GF	d0,5 PM
	AC-16S 5°C	0,000	0,000	0,239	0,171
	AC-16S 20°C	0,000	0,327	0,395	0,061
	AC-22S 5°C	0,336	0,003	0,610	0,285
	AC-22S 20°C	0,252	0,013	0,006	0,609

Tabla 4.16 - Resumen resultados test T-Student variación altura de la probeta

#### *4.6.1.2 Porcentaje de Huecos (H%)*

Empezaremos analizando la afectación de la diferencia de altura al porcentaje de huecos de las mezclas.

Mirando los resultados extraídos del test estadístico T-Student, podemos observar que, comparando muestras de diferentes alturas, pero con un tamaño de árido máximo igual entre sí, existe una relación. Para el AC-16S analizamos que los p-value obtenidos son menores al 0,05 requerido, así pues, existen diferencias significativas con dicha granulometría. En cambio, con un tamaño granulométrico máximo mayor, observamos como el valor de p-value es superior al exigido, indicándonos que la diferencia entre ambas comparaciones no es significativa.

#### *4.6.1.3 Índice de Rigidez a Tracción (IRT)*

Al analizar el Índice de Rigidez a Tracción nos encontramos con que la diferencia de altura de las probetas presenta una gran influencia en él.

Vemos como para los ensayos a 5°C de ambas granulometrías, el p-value del IRT es menor a 0,05. Al analizar la comparación entre muestras AC-22S a 20°C, tenemos un p-value de 0,013, inferior a 0,05, aportándonos información sobre la influencia del parámetro IRT a esta granulometría ensayada a 20°C.

Por otro lado, para las muestras AC-16S a 20°C tenemos un valor de 0,327, siendo este superior a 0,05, nos muestra que el IRT en dicha temperatura no tiene una afectación significativa.

Haciendo un análisis de todos los resultados, vemos que solo existe un caso en el que no hay influencia entre la altura de la probeta y el índice de rigidez a tracción, correspondiente con el de las series de AC-16S a 20°C.

#### ***4.6.1.4 Energía de Fractura (GF)***

En el estudio de la energía de fractura se observa para las muestras de mismo tamaño máximo AC-16S, pero de diferente altura, que no hay una afectación sensible al ensayo, resultando valores de p-value mayores a 0,05.

En cambio, para las muestras AC-22S vemos que a temperatura igual a 20°C el p-value es menor al exigido, indicando que sufren diferencias significativas las probetas puestas a comparación. Por otro lado, con el mismo tamaño máximo de árido, pero a una temperatura menor (a 5°C), vemos que el p-value es mayor a 0,05 por lo que no presentan diferencias significativas.

De este modo concluimos que la influencia de la altura de la probeta sobre el parámetro GF solo la vemos en la comparación de las series AC-22S de diferentes alturas ensayadas a 20°C. En las otras comparaciones no existe dicha influencia.

#### ***4.6.1.5 Desplazamiento 50% de carga máxima postpico (d0,5 PM)***

Concluimos el análisis de parámetros según la altura de la probeta con el de desplazamiento al 50% de la carga máxima postpico.

Según los resultados obtenidos del test, vemos como los p-value de todas las comparaciones, independientemente de la temperatura que tienen y del tamaño máximo de árido, cumplen con el requisito de ser mayores a 0,05. De este dato podemos extraer que la diferencia de tamaño no influye sobre el desplazamiento al 50% de la carga máxima postpico en las mezclas bituminosas densas analizadas.

#### ***4.6.2 Influencia del tamaño máximo de los áridos***

Seguidamente cogeremos el tamaño máximo de árido como objeto de estudio y análisis. Hemos fabricado con dos tamaños máximos (AC-16S y AC-22S) ensayando cada uno de ellos a 5°C y a 20°C. De este modo el estudio se realiza comparando diferencias granulométricas, pero con la misma altura de probeta y la misma temperatura.

Primero veremos un resumen de los resultados extraídos mediante los cálculos estadísticos (con el test T-Student) y posteriormente analizaremos estos resultados para cada parámetro.

#### 4.6.2.1 Resultados T-Student

A continuación, tenemos las tablas resumen para visualizar de una manera más sencilla y rápida los resultados finales del estudio estadístico p-value de diferente tamaño máximo de árido, sabiendo que dicho valor debe ser mayor a 0,05 para que el parámetro analizado no presente diferencias significativas a la variación de dicho tamaño máximo. Por el contrario, si el valor del p-value es menor a 0,05 diremos que sí que existen diferencias significativas entre las muestras comparadas.

Las tablas mostradas a continuación indican los valores mayores a 0,05 en verde y los menores en rojo:

- 4cm 5°C: AC-16S vs AC-22S

4cm 5°C: AC-16S vs AC-22S				
	H (%)	IRT	GF	d0,5 PM
p-value	0,382	0,858	0,289	0,007

Tabla 4.17 - Resultados test T-Student 4cm 5°C: AC-16S vs AC-22S

- 4cm 20°C: AC-16S vs AC-22S

4cm 20°C: AC-16S vs AC-22S				
	H (%)	IRT	GF	d0,5 PM
p-value	0,276	0,007	0,220	0,022

Tabla 4.18 - Resultados test T-Student 4cm 20°C: AC-16S vs AC-22S

- 6cm 5°C: AC-16S vs AC-22S

6cm 5°C: AC-16S vs AC-22S				
	H (%)	IRT	GF	d0,5 PM
p-value	0,000	0,571	0,629	0,783

Tabla 4.19 - Resultados test T-Student 6cm 5°C: AC-16S vs AC-22S

- 6cm 20°C: AC-16S vs AC-22S

6cm 20°C: AC-16S vs AC-22S				
	H (%)	IRT	GF	d0,5 PM
p-value	0,000	0,003	0,589	0,831

Tabla 4.20 - Resultados test T-Student 6cm 20°C: AC-16S vs AC-22S

Resumiremos las tablas anteriores en una general para una visualización más clara de las observaciones que realizaremos en los siguientes apartados:

AC-16S vs AC-22S	Probeta	H%	IRT	GF	d0,5 PM
	4cm 5°C	0,382	0,858	0,289	0,007
	4cm 20°C	0,276	0,007	0,220	0,022
	6cm 5°C	0,000	0,571	0,629	0,783
	6cm 20°C	0,000	0,003	0,589	0,831

Tabla 4.21 - Resumen resultados test T-Student variación tamaño máximo del árido



#### ***4.6.2.2 Porcentaje de Huecos (H%)***

Observando las tablas del apartado anterior, podemos ver cierta afectación de la granulometría en el porcentaje de huecos de la mezcla. Según el estudio realizado, en las probetas de 4cm de altura los p-values son superiores al 0,05 exigido, por lo que no son grupos significativamente diferentes. Mientras tanto, las probetas con una altura de 6cm, vemos como los resultados son menores de lo exigido, lo que representa una mayor diferenciación de dicho parámetro a una mayor altura de probeta.

#### ***4.6.2.3 Índice de Rigidez a Tracción (IRT)***

Estudiando el Índice de Rigidez a Tracción observamos que dicho parámetro presenta puede estar influenciado por la temperatura de las probetas.

Para las muestras analizadas a 5°C, el p-value es mayor a 0,05, indicándonos que las comparaciones a esta temperatura no muestran diferencias significativas.

Por lo contrario, si miramos las muestras ensayadas a 20°C, vemos como la diferencia del tamaño máximo sí que influye a estas temperaturas, aportándonos unos valores menores a 0,05 que nos muestran la diferencia existente entre ambas comparaciones realizadas a temperatura mayor.

Concluimos que el tamaño máximo de árido tiene mayor implicación en el IRT cuánto mayor es la temperatura a la que se ven sometidas las mezclas bituminosas densas analizadas.

#### ***4.6.2.4 Energía de Fractura (GF)***

Continuamos con el análisis de la afectación de la diferencia de tamaño máximo en la Energía de Fractura producida durante el ensayo.

Podemos observar cómo según los resultados extraídos del test estadístico, todos los valores p-value de las cuatro comparaciones realizadas siguen el mismo patrón: son mayores al 0,05 exigido. De esta manera podemos decir que variando el tamaño del árido no presenta una afectación significativa a dicho parámetro.

Por otro lado, si nos regimos por los valores extraídos, vemos como la tendencia del p-value es a la baja cuanto menor es la altura de la probeta.

#### ***4.6.2.5 Desplazamiento 50% de carga máxima postpico (d0,5 PM)***

Finalmente, analizando el último parámetro que nos queda, vemos como las probetas de 4cm de altura tienen un valor menor a 0,05, lo que indica que han obtenido resultados significativamente distintos. Todo lo contrario que para las probetas de mayor altura, las de 6cm, las cuales presentan unos p-value muy elevados, dejando una clara constancia de que la diferencia del tamaño máximo del árido, en nuestro estudio, afecta al desplazamiento al 50% de la carga máxima postpico cuanto menor es la altura.

#### ***4.6.3 Discusión de casos particulares***

En el análisis de los huecos vemos como al compactar las mezclas con la misma energía de compactación para menor altura de probetas se ha observado una reducción en el contenido de huecos para las probetas de 4cm respecto a la de 6cm, hecho justificado porque ha recibido mayor energía de compactación por unidad de volumen.

Dicha diferencia de huecos podría afectar a los resultados de rigidez IRT.

En cuanto al análisis de los parámetros de rigidez IRT y energía GF, también se muestran algunos resultados en casos donde parece que las variables estudiadas afectan a estos parámetros.

Habría que tener en cuenta que el tamaño de las muestras (16 probetas) es pequeño desde el punto de vista estadístico y que se ha considerado un grado de confiabilidad muy alto.

Por último, en el caso del desplazamiento d0,5 PM, el test que compara las probetas de las mezclas AC16 y AC22 de 4cm, tanto a 5 como a 20°C, indica diferencias significativas, si bien es cierto que podría haber tenido lugar alguna diferencia de fabricación que podría afectar a estos resultados.

## CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES

### 5.1 Conclusiones del trabajo

Una vez realizado el estudio experimental y estadístico de las mezclas bituminosas densas a ensayo Fénix, podemos concretar varias conclusiones:

Hemos fabricado mezclas bituminosas densas bajo la premisa de compararlas modificando determinadas variables: la altura de la probeta y el tamaño máximo de árido. En estas comparaciones hemos estudiado una característica propia de la mezcla, concretamente el porcentaje de huecos, y hemos analizado la sensibilidad en los parámetros Fénix obtenidos (RT, IRT, GF y d<sub>0,5</sub> PM).

En cuanto al porcentaje de huecos de las mezclas, se ha detectado que una de las series estudiadas, la correspondiente a las mezclas AC16 en probetas de 6cm de altura, ha sido diferente del resto, lo que ha resultado en diferencias significativas con respecto a las probetas de 4cm (del 0,9 al 1% más). Una hipótesis que explicaría estas diferencias es que al tratarse de una probeta de mayor volumen y recibir la misma energía de compactación que la probeta de menor altura, el grado de compactación alcanzado sea menor. Sin embargo, al compararlas con las probetas de la mezcla AC22 del mismo tamaño (6cm), también se aprecian diferencias. Por tanto, el motivo más probable del incremento de huecos podría ser un defecto de fabricación o compactación (un descenso de la temperatura de la mezcla durante la compactación podría haber modificado la viscosidad del betún y haber afectado al acomodamiento de las partículas de los áridos).

En el estudio de valores medios de los parámetros Fénix, apreciamos que no perciben variaciones significativas a causa de los cambios de variables de las muestras. Asimismo, todos los coeficientes de variación calculados presentan unos valores considerados aceptables en el ensayo de muestras bituminosas.

La resistencia a tracción (RT) no ha sido necesario analizarla estadísticamente porque hemos podido comprobar que repite muy bien.

De la comparación bajo la premisa de la diferencia de altura en las probetas, hemos visto que no afecta al desplazamiento al 50% de la carga máxima postpico en ninguno de los casos. Caso similar ocurre con la energía de fractura, dónde no presenta ningún tipo de cambio significativo exceptuando en la comparación entre mezclas AC22 a 20°C, siendo ésta la comparación con mayor afectación, influyendo a su vez al IRT. La comparación entre probetas AC16 a 20°C no presenta ninguna diferencia significativa en sus parámetros.

Analizando la comparación marcada por la diferencia del tamaño máximo de árido, vemos como esta vez el parámetro que no se ve afectado es la energía de fractura (GF). En cambio, en las muestras ensayadas a 20°C, observamos como padecen diferencias significativas en el IRT, mientras que a 5°C no se ve afectado dicho parámetro. Por otro lado, las probetas de menor tamaño sí que presentan dichas diferencias en el parámetro de desplazamiento al 50% de la carga máxima postpico, mientras que en las de 6cm no se distinguen influencias importantes.

Finalmente, las comparaciones realizadas han mostrado que no se presentan cambios significativos entre la mayoría de los parámetros evaluados al variar la altura de la probeta y el tamaño máximo del árido, aunque en algunos casos sí se han detectado diferencias. En cualquier caso, es importante tener en cuenta que puede haber factores que incidan en la respuesta a la fisuración de las mezclas bituminosas, como los posibles defectos de fabricación de las probetas. Desde el punto de vista estadístico, también se debe considerar que el tamaño de muestra puede afectar a las pruebas realizadas (si se aumenta el tamaño de la muestra también se incrementa la potencia del análisis y los resultados podrían modificarse).

El ensayo Fénix es un ensayo con una complejidad de realización baja, desde la fabricación y preparación de las probetas, hasta su ensayo y la interpretación de los datos registrados. El desarrollo del ensayo no precisa mucho tiempo de ejecución.

## **5.2 Futuras líneas de investigación**

Con objeto de profundizar el análisis realizado en este Trabajo Final de Grado, sería interesante continuar esta línea de investigación ampliando el abanico de mezclas bituminosas (tipo y contenido de betún, granulometrías) y las temperaturas de ensayo. Asimismo, podría realizarse el análisis estadístico con diferentes grados de confiabilidad y ampliar el tamaño de las muestras.

## CAPÍTULO 6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Temario parte específica. Especialidad: Régimen Jurídico del Tráfico. Convocatoria 2011. Tema 8 - Legislación española en materia de transporte por carretera. Ley de Ordenación del Transporte Terrestre y Reglamentos que la desarrollan. Las autorizaciones para el transporte. Competencia sancionadora por infracciones a la normativa de los transportes por carretera, su tramitación y recursos.
- [2] Andreu Coma, M. (2015). Aplicación del ensayo Fénix al diseño de una mezcla bituminosa semidensa. Efecto del tipo de betún (Bachelor's thesis, Universitat Politècnica de Catalunya).
- [3] Molenaar A, A. Scarpas, X. Liu and S. Erkens, Semi-Circular Bending Test; Simple but Useful? Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 71, pp. 795-815, 2002.
- [4] Valdés Vidal, G., Miró Recasens, R., & Martínez Reguero, A. (2015). Assessment of the adhesive capacity of asphalt binders in the aggregate-binder bonds by means of new methodology. Revista de la construcción, 14(1), 69-76.
- [5] Pérez Jiménez, F., Miró Recasens, R., Fonseca Rodriguez, C. (1997). << Essai BDT pour la détermination de la tenacité et résistance au fissurage des melanges bitumineux>> Quatrieme Symposium International RILEM <<Essais mecaniques pour les materiaux bitumineux >>, Lyon, pp. 391-396.
- [6] Pérez-Jiménez, F., Valdés, G., Miró, R., Martínez, A., & Botella, R. (2010). Fénix test: development of a new test procedure for evaluating cracking resistance in bituminous mixtures. Transportation research record, 2181(1), 36-43.
- [7] Declaraciones de prestaciones - SORIGUÉ. N.º DdP09-2004TO/4ASF.CUM.
- [8] Revista Colombiana de Estadística Volumen 29 No 1. pp. 57 a 76. Junio 2006

### Otra bibliografía:

Boletín Oficial del Estado. Artículo 543: Mezclas bituminosas para capas de rodadura.

Pliego de prescripciones técnicas generales para obras de carreteras y puentes. 2004 FOM/891/2004

<https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/3252/50777-8.pdf?sequence=8&isAllowed=y>

[https://www.emis.de/journals/RCE/V29/V29\\_1\\_57Correalral.pdf](https://www.emis.de/journals/RCE/V29/V29_1_57Correalral.pdf)

## ANEJOS

### ANEJO 1

#### *Geometría de las probetas y densidades*

Adjuntamos copias de las hojas usadas durante el estudio experimental en el laboratorio, dónde podemos ver características geométricas de la probeta como la distancia de ranura (DR), la distancia total (DT) y las tres alturas ( $H_n$ ) tomadas en cada probeta, así como también los pesos y densidades de cada una.

# AC-16S 4cm

- Distancias de ranura (DR)

Probeta Num	H1 (mm)	H2 (mm)	H3 (mm)	Hm (mm)	Peso seco (g)	Peso Sumergido (g)	P B S S (g)	Densidad (g/cm3)	Densidad Media
1-A-800									
D.R.	44'0	45'2							
1-B-800									
D.R.	44'3	45'3							
2-A-800									
D.R.	42'4	42'5							
2-B-800									
D.R.	43'1	42'2							
3-A-800									
D.R.	42'0	41'6							
3-B-800									
D.R.	43'3	41'6							
4-A-800									
D.R.	41'7	43'4							
4-B-800									
D.R.	43'2	41'4							
5-A-800									
D.R.	42'2	41'6							
5-B-800									
D.R.	42'9	42'1							
6-A-800									
D.R.	43'0	41'6							
6-B-800									
D.R.	43'1	42'1							
7-A-800									
D.R.	41'9	42'5							
7-B-800									
D.R.	43'0	42'1							
8-A-800									
D.R.	42'4	41'9							
8-B-800									
D.R.	41'2	42'3							

Probeta Núm.	H1 (mm)	H2 (mm)	H3 (mm)	Hm (mm)	Peso Seco (g)	Peso Sumergido (g)	P. S. S. (g)	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Densidad Media
9-A-800									
D.R.	41'8	42'9							
9-B-800									
D.R.	43'1	41'6							
10-A-800									
D.R.	41'9	42'8							
10-B-800									
D.R.	42'0	42'2							
11-A-800									
D.R.	42'4	41'2							
11-B-800									
D.R.	43'0	42'4							
12-A-800									
D.R.	41'9	42'4							
12-B-800									
D.R.	42'8	42'2							
13-A-800									
D.R.	41'7	42'8							
13-B-800									
D.R.	43'2	42'2							
14-A-800									
D.R.	42'0	42'7							
14-B-800									
D.R.	43'0	42'2							
15-A-800									
D.R.	41'3	42'6							
15-B-800									
D.R.	43'1	41'7							
16-A-800									
D.R.	41'6	42'5							
16-B-800									
D.R.	43'3	41'9							



- Alturas, peso y densidades

Probeta Núm.	H1 (mm)	H2 (mm)	H3 (mm)	H4 (mm)	Peso Base (g)	Peso Sumergido (g)	Peso P.S.S. (g)	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Densidad Mód.
1-800	42'8	43'1	43'1		826'1	490'9	827'6	2'455	
2-800	43'4	43'6	43'6		825'2	487'6	827'1	2'430	
3-800	42'6	43'3	43'2		832'1	495'4	833'5	2'461	
4-800	43'9	43'3	43'2		831'9	494'6	833'4	2'455	
5-800	43'1	43'1	43'2		832'4	495'1	834'4	2'459	
6-800	42'6	42'5	42'4		820'9	487'2	822'2	2'426	
7-800	43	43'1	43'1		840'6	499'4	842'5	2'450	
8-800	43	42'6	42'4		824'0	487'8	825'9	2'437	
9-800	42'8	42'6	42'4		831'9	494'8	834'0	2'452	
10-800	42'9	43'1	42'8		821'2	487'6	824'3	2'450	
11-800	43'8	43'3	43'3		845'3	502'6	847'1	2'453	
12-800	43	42'7	42'8		830'1	492'2	832'0	2'446	
13-800	43'2	42'8	42'7		835'1	493'3	839'8	2'454	
14-800	42'9	43'3	43'4		828'9	492'4	831'7	2'442	
15-800	43'1	43'4	43'1		834'2	495'9	835'9	2'453	
16-800	43'3	43	43'1		827'9	490'3	830'0	2'427	

# AC-16S 6cm

- Distancias de ranura (DR) y distancias totales (DT)

Probeta Núm.	H1 (mm)	H2 (mm)	H3 (mm)	Hm (mm)	Peso seco (g)	Peso Sumergido (g)	P.S.S (g)	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Densidad Media
1-A-1100									
DR	40'6	43'1							
DT	44'5	49'9							
1-B-1100									
DR	42'8	42'0							
DT	48'7	49'1							
2-A-1100									
DR	42'1	42'5							
DT	49'6	49'8							
2-B-1100									
DR	42'2	43'1							
DT	49'0	48'8							
3-A-1100									
DR	42'1	42'7							
DT	49'7	50'0							
3-B-1100									
DR	42'8	43'1							
DT	49'0	48'8							
4-A-1100									
DR	40'7	43'0							
DT	50'0	50'3							
4-B-1100									
DR	41'9	43'5							
DT	48'8	48'5							
5-A-1100									
DR	40'4	43'0							
DT	50'2	50'7							
5-B-1100									
DR	41'8	43'0							
DT	48'7	48'3							

Probeta (mm)	H1 (mm)	H2 (mm)	H3 (mm)	H4 (mm)	Peso Saco (g)	Peso Sumergido (g)	P S S S (g)	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Densidad Media
6-A-100									
DR	41'9	43'4							
DT	51'1	51'3							
6-B-100									
DR	42'3	43'0							
DT	48'1	47'7							
7-A-100									
DR	40'5	41'0							
DT	49'4	50'0							
7-B-100									
DR	42'0	43'0							
DT	49'3	48'8							
8-A-100									
DR	42'3	42'7							
DT	49'2	49'8							
8-B-100									
DR	41'9	42'8							
DT	49'2	48'4							
9-A-100									
DR	40'9	43'1							
DT	49'2	49'8							
9-B-100									
DR	42'0	43'6							
DT	49'2	49'1							
10-A-100									
DR	43'6	42'9							
DT	49'8	50'1							
10-B-100									
DR	42'5	43'1							
DT	48'9	48'9							



Model	H1 (mm)	H2 (mm)	H3 (mm)	H4 (mm)	PBS (g)	PBS Sum (g)	PBS (g)	Dans (g)	Dans (g)
11-A-1100									
DR	43'4	43'1							
DT	49'6	50'1							
11-B-1100									
DR	42'3	43'4							
DT	49'4	48'9							
12-A-1100									
DR	41'2	42'8							
DT	49'8	50'0							
12-B-1100									
DR	42'1	43'6							
DT	49'2	48'6							
13-A-1100									
DR	41'3	41'2							
DT	49'2	50'2							
13-B-1100									
DR	41'9	42'9							
DT	49'2	48'6							
14-A-1100									
DR	43'0	43'4							
DT	49'2	50'0							
14-B-1100									
DR	42'3	43'3							
DT	48'9	48'5							
15-A-1100									
DR	43'4	41'0							
DT	50'0	50'0							
15-B-1100									
DR	41'8	42'8							
DT	48'8	48'9							
16-A-1100									
DR	43'5	42'6							
DT	49'2	50'0							
16-B-1100									
DR	42'0	42'2							
DT	48'9	48'4							

- Alturas, pesos y densidades

Probeta Núm.	H1 (mm)	H2 (mm)	H3 (mm)	Hm (mm)	Peso Seco (g)	Peso Sumergido (g)	P.S.S. (g)	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Densidad Media
1 ↑	58'9	58'9	59'2		1143'2	675'5	1155'0		
2	59'2	59'1	59'3		1140'9	674'3	1153'4		
3	59'8	59'6	60		1134'2	665'7	1137'7		
4 ↓	58'8	58'9	59'1		1150'4	682'5	1152'6		
5 ↑	59'3	59'3	59'5		1136'0	667'7	1139'1		
6	59'4	59'1	59'4		1149'5	681'2	1152'6		
7	58'8	58'8	59'2		1135'6	670'1	1138'4		
8 ↓	59'3	59'5	59'9		1154'8	684'3	1157'6		
9 ↑	59'1	58'8	59'2		1128'8	664'2	1132'5		
10	60'4	60'3	60'1		1155'0	678'7	1159'7		
11	59'1	59	59		1133'2	667'1	1137'5		
12 ↓	59'8	60	59'7		1153'0	683'1	1156'7		
13 ↑	58'7	58'8	58'7		1134'3	670'1	1137'8		
14	59	59	59'3		1146'9	679'7	1150'5		
15	59	58'9	58'7		1128'6	665'5	1132'6		
16 ↓	59'2	59'1	59'1		1150'3	682'3	1152'8		

# AC-22S 4cm

- Distancias de ranura (DR) y distancias totales (DT)

Probeta (cm)	H1 (mm)	H2 (mm)	H3 (mm)	Hm (mm)	Peso Seco (g)	Peso Sumergido (g)	P S S S (g)	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Densidad Media
1-A-800									
DT	48.37	48.45							
DR	42.33	43.83							
1-B-800									
DT	50.15	50.57							
DR	44.73	44.00							
2-A-800									
DT	48.67	48.62							
DR	43.01	43.85							
2-B-800									
DT	50.14	50.46							
DR	44.76	43.64							
3-A-800									
DT	48.43	48.41							
DR	43.41	43.37							
3-B-800									
DT	50.47	50.53							
DR	45.34	43.79							
4-A-800									
DT	48.50	48.50							
DR	43.81	44.03							
4-B-800									
DT	50.28	50.49							
DR	43.36	43.51							
5-A-800									
DT	48.74	48.51							
DR	43.59	43.54							
5-B-800									
DT	50.19	50.41							
DR	45.10	43.61							

Probeta Hm	H1 (mm)	H2 (mm)	H3 (mm)	Hm (mm)	Peso Seco (g)	Peso Sumergido (g)	P 3 3 3 (g)	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Densidad Media
6-A-800									
DT	48.47	48.35							
DL	43.44	43.42							
6-B-800									
DT	50.13	50.41							
DL	45.02	43.55							
7-A-800									
DT	50.17	50.60							
DL	44.46	43.73	44.46						
7-B-800									
DT	48.77	48.46							
DL	43.39	44.20							
8-A-800									
DT	48.80	48.30							
DL	44.66	43.34							
8-B-800									
DT	50.02	50.63							
DL	43.39	44.24							
9-A-800									
DT	48.70	48.74							
DL	43.31	44.10							
9-B-800									
DT	50.22	50.25							
DL	43.76	44.69							
10-A-800									
DT	48.74	48.43							
DL	43.48	43.64							
10-B-800									
DT	50.22	50.32							
DL	44.75	43.39							



Problema (cm)	H1 (mm)	H2 (mm)	H3 (mm)	H4 (mm)	Peso: Saco (g)	Peso: Suma (g)	Peso: S (g)	Densidad 20/13	Densidad Mala
11-A-800									
OT	48.97	48.69							
OR	43.47	44.15							
11-B-800									
OT	49.88	50.31							
OR	44.53	43.68							
12-A-800									
OT	48.62	48.80							
OR	44.19	43.47							
12-B-800									
OT	50.09	50.0							
OR	44.10	43.84							
13-A-800									
OT	48.80	48.49							
OR	44.22	43.80							
13-B-800									
OT	49.82	50.38							
OR	43.35	44.15							
14-A-800									
OT	48.66	48.66							
OR	43.52	43.63							
14-B-800									
OT	50.21	50.26							
OR	44.52	43.72							
15-A-800									
OT	49.80	50.22							
OR	44.51	43.35							
15-B-800									
OT	49.14	48.69							
OR	43.19	43.95							
16-A-800									
OT	48.74	48.73							
OR	43.15	44.37							
16-B-800									
OT	49.96	50.42							
OR	44.81	44.45							

16-B-800

OT =

OR =



- Alturas, pesos y densidades

Probeta Núm.	H1 (mm)	H2 (mm)	H3 (mm)	Hm (mm)	Peso Seco (g)	Peso Sumergido (g)	P.S.S. (g)	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Densidad Media
1-800	42.5	42.8	42.6		826.4	492.3	828.7	2.46	2.47
2-800	42.0	42.0	42.1		817.2	489.8	819.0	2.47	
3-800	43.0	42.5	42.6		835.7	499.3	837.1	2.47	
4-800	42.2	42.0	42.6		828.0	493.1	829.5	2.46	
5-800	42.6	42.7	42.8		825.8	490.8	827.5	2.45	
6-800	42.4	42.4	42.2		823.7	492.0	825.5	2.47	
7-800	42.9	42.2	42.8		826.2	492.1	827.6	2.47	
8-800	42.5	42.9	42.8		827.4	492.7	829.0	2.46	
9-800	42.5	42.1	42.3		827.4	494.7	828.5	2.48	
10-800	42.5	42.6	42.4		826.0	492.6	827.7	2.46	
11-800	42.3	42.0	42.6		822.5	491.9	824.1	2.48	
12-800	42.4	42.3	42.6		823.2	489.9	824.8	2.46	
13-800	42.5	42.3	43.0		827.6	492.0	829.3	2.45	
14-800	42.4	42.20	42.2		820.6	490.3	822.2	2.47	
15-800	42.3	42.4	42.2		826.9	492.7	827.9	2.47	
16-800	42.3	42.2	42.7		826.0	493.4	827.2	2.47	

# AC-22S 6cm

- Distancias de ranura (DR) y distancias totales (DT)

Procesos	H1 (mm)	H2 (mm)	H3 (mm)	H4 (mm)	Paso 5000 (g)	Paso Suma (g)	P 500 (g)	Cantidad (2013)	Cantidad Mada
1-A-1100									
DT	49.20	48.87							
DR	44.67	43.92							
1-B-1100	<del>49.71</del>	<del>50.0</del>							
DT	49.79	50.0							
DR	43.44	44.34							
2-A-1100									
DT	49.17	50.28							
DR	45.11	43.52							
2-B-1100									
DT	49.37	49.07							
DR	43.74	43.85							
3-A-1100									
DT	48.90	48.57							
DR	42.82	44.18							
3-B-1100									
DT	49.96	50.64							
DR	44.81	43.49							
4-A-1100									
DT	49.35	48.74							
DR	43.02	44.02							
4-B-1100									
DT	49.63	50.17							
DR	44.60	44.50							
5-A-1100									
DT	48.85	48.72							
DR	43.20	43.44							
5-B-1100									
DT	49.71	50.11							
DR	44.66	43.55							
6-A-1100									
DT	49.11	48.63							
DR	42.85	44.01							
6-B-1100									
DT	49.63	50.38							
DR	44.34	43.68							

Probeta (cm)	H1 (mm)	H2 (mm)	H3 (mm)	H4 (mm)	Peso: Seco (g)	Peso: Sumergido (g)	Peso: B (g)	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Densidad Mala (g)
7-A 1100									
DT	48.74	48.60							
DR	43.65	43.44							
7-B-1100									
DT	49.90	50.20							
DR	44.17	44.20							
8-A 1100									
DT	48.47	48.74							
DR	43.16	44.10							
8-B 1100									
DT	50.13	50.20							
DR	44.86	43.38							
9-A 1100									
DT	48.86	48.69							
DR	43.09	43.79							
9-B 1100									
DT	50.20	50.56							
DR	44.44	43.88							
10-A-1100									
DT	49.18	48.60							
DR	43.11	43.83							
10-B-1100									
DT	49.66	50.41							
DR	44.10	43.67							
11-A-1100									
DT	50.24	50.17							
DR	44.60	44.11							
11-B-1100									
DT	48.67	48.80							
DR	42.75	44.05							

Probeta Dim	H1 (mm)	H2 (mm)	H3 (mm)	Hm (mm)	Peso seco (g)	Peso Sumergido (g)	Peso (g)	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Densidad Media
12-A-1100									
DT	49.98	50.25							
DR	49.81	49.15							
12-B-1100									
DT	48.83	48.50							
DR	43.07	43.61							
13-A-1100									
DT	49.90	50.29							
DR	44.26	43.66							
13-B-1100									
DT	48.87	48.71							
DR	43.55	42.74							
14-A-1100									
DT	49.15	48.38							
DR	43.02	44.19							
14-B-1100									
DT	49.92	50.27							
DR	44.40	43.95							
15-A-1100									
DT	48.69	48.45							
DR	44.98	43.10							
15-B-1100									
DT	50.44	50.02							
DR	44.45	44.79							
16-A-1100									
DT	49.10	48.45							
DR	43.36	44.01							
16-B-1100									
DT	49.83	50.48							
DR	44.74	43.65							

- Alturas, peso y densidades

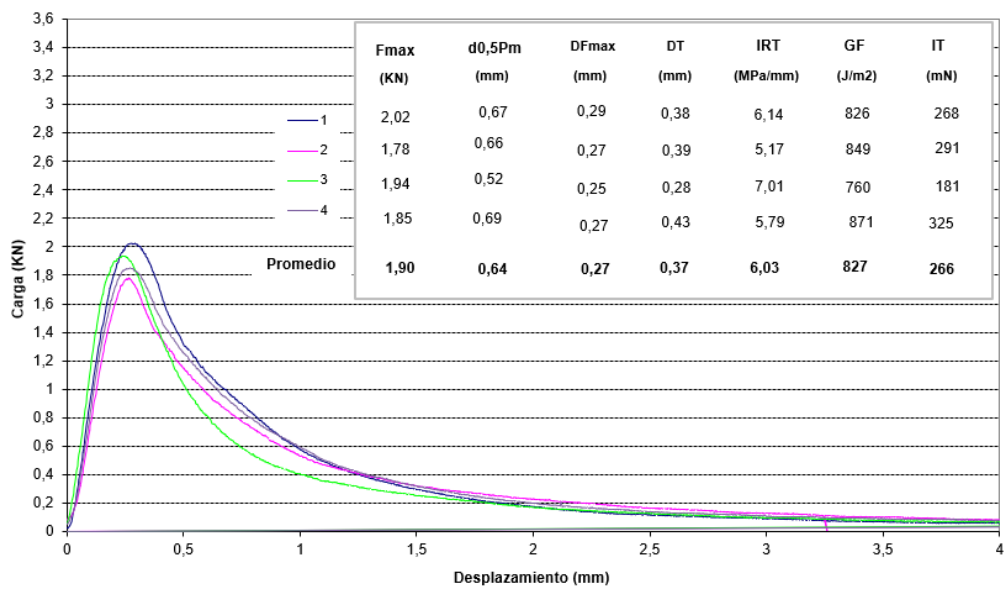
Probeta Núm	H1 (mm)	H2 (mm)	H3 (mm)	Hm (mm)	Peso seco (g)	Peso Sumergido (g)	P S S (g)	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Densidad Media
1-1100	58.01	58.15	58.57		1133.7	675'3	1136'0		
2-1100	58.1	58.19	57.64		1139.4	680'0	1141'1		
3-1100	57.94	57.70	57.62		1129.8	673'3	1131'4		
4-1100	58.88	59.34	59.02		1157.0	688'3	1158'9		
5-1100	57.61	57.48	57.89		1119.4	666'7	1121'6		
6-1100	59.70	59.16	59.27		1164.3	694'9	1165'7		
7-1100	58.41	59.00	58.75		1136.0	675'8	1137'9		
8-1100	58.13	58.30	57.90		1142.5	683'1	1144'2		
9-1100	58.71	58.35	58.13		1138.5	677'5	1140'7		
10-1100	58.06	58.50	58.58		1142.1	681'2	1144'0		
11-1100	58.94	58.61	58.08		1135.9	675'4	1138'3		
12-1100	59.13	58.56	58.68		1142.9	680'4	1144'6		
13-1100	58.44	58.46	58.75		1138.9	679'0	1141'3		
14-1100	58.43	58.29	58.54		1144.1	681'6	1145'9		
15-1100	59.17	58.81	58.61		1135.1	675'6	1138'3		
16-1100	58.17	59.04	58.37		1142.2	681'0	1144'6		
17-1100	58.05	58.36	57.85		1136.3	677'6	1137'7		

ANEJO 2

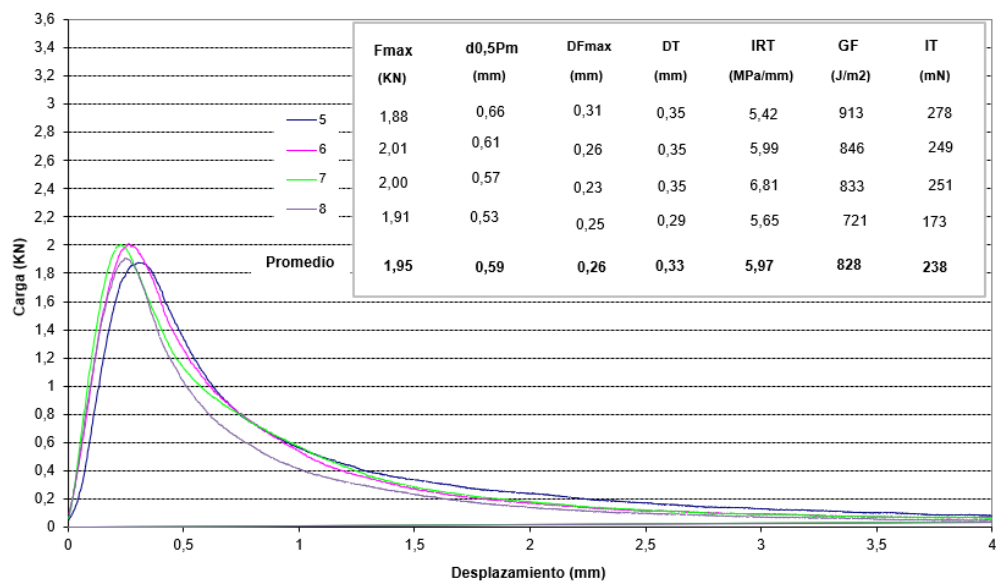
Gráficas ensayo Fénix

AC16 4cm 5°C

Ensayo Fénix a 5°C y 1 mm/min.

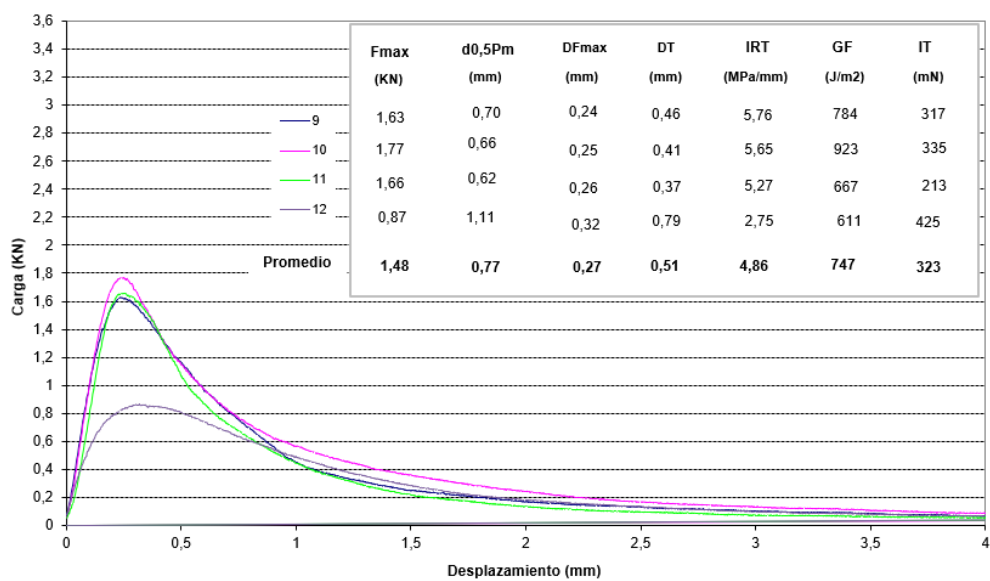


Ensayo Fénix a 5°C y 1 mm/min.

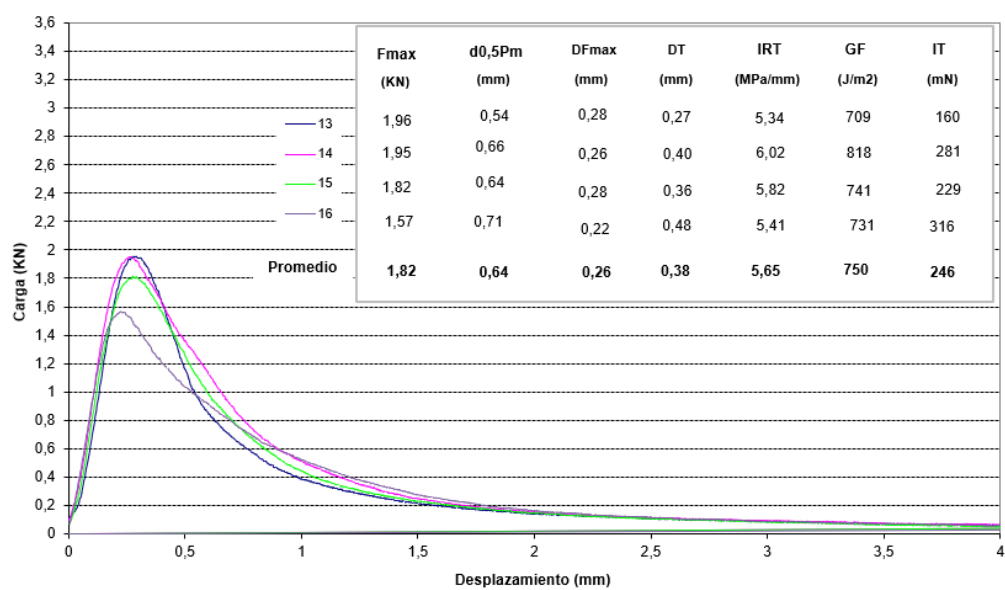




Ensayo Fénix a 5°C y 1 mm/min.

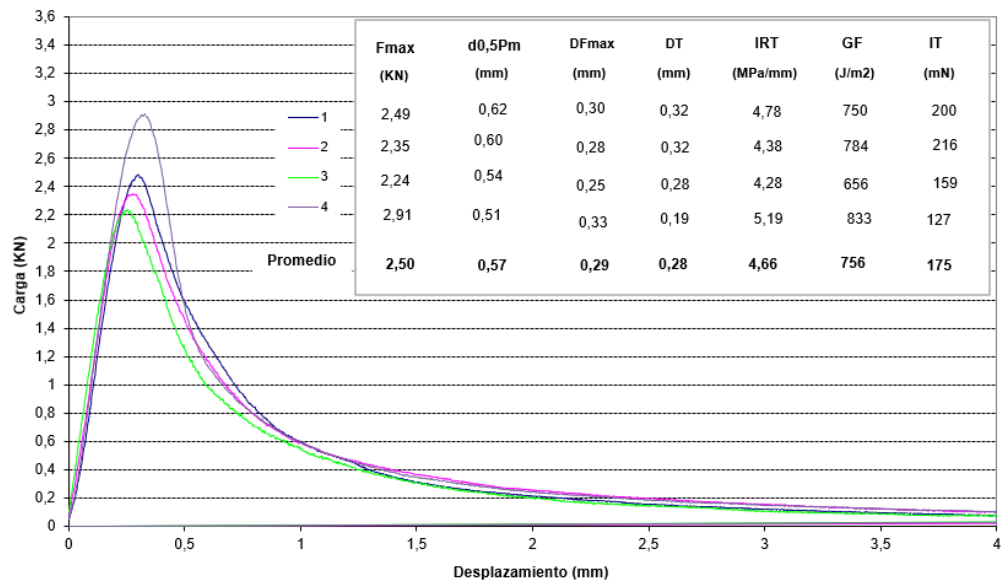


Ensayo Fénix a 5°C y 1 mm/min.

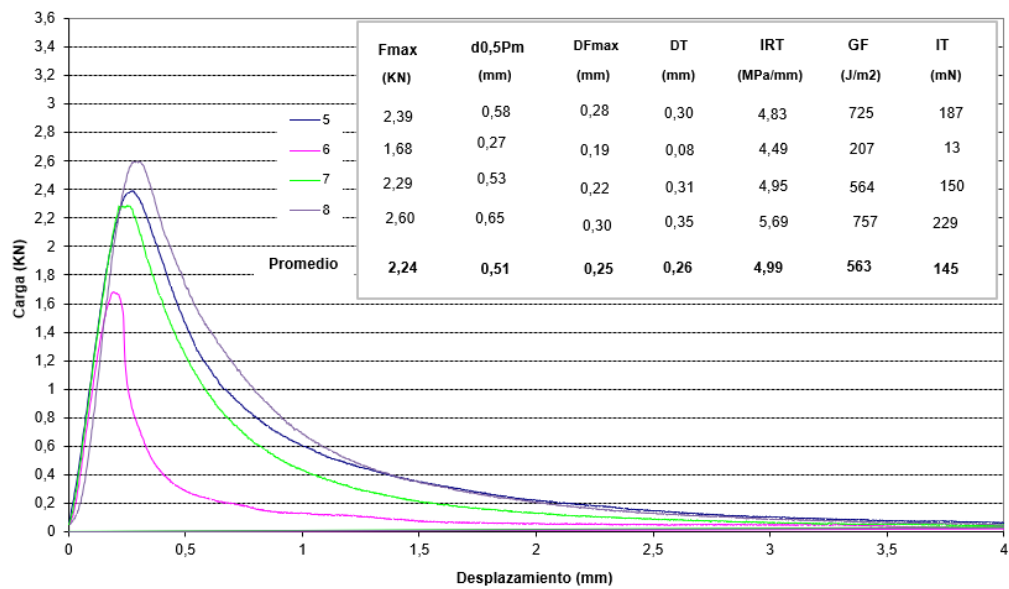


## AC16 6cm 5°C

Ensayo Fénix a 5°C y 1 mm/min.

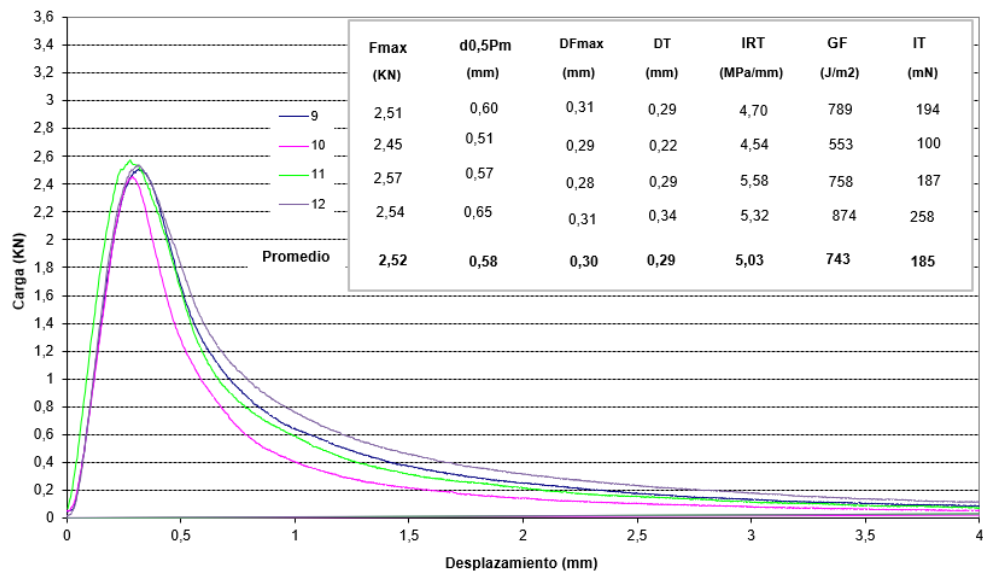


Ensayo Fénix a 5°C y 1 mm/min.

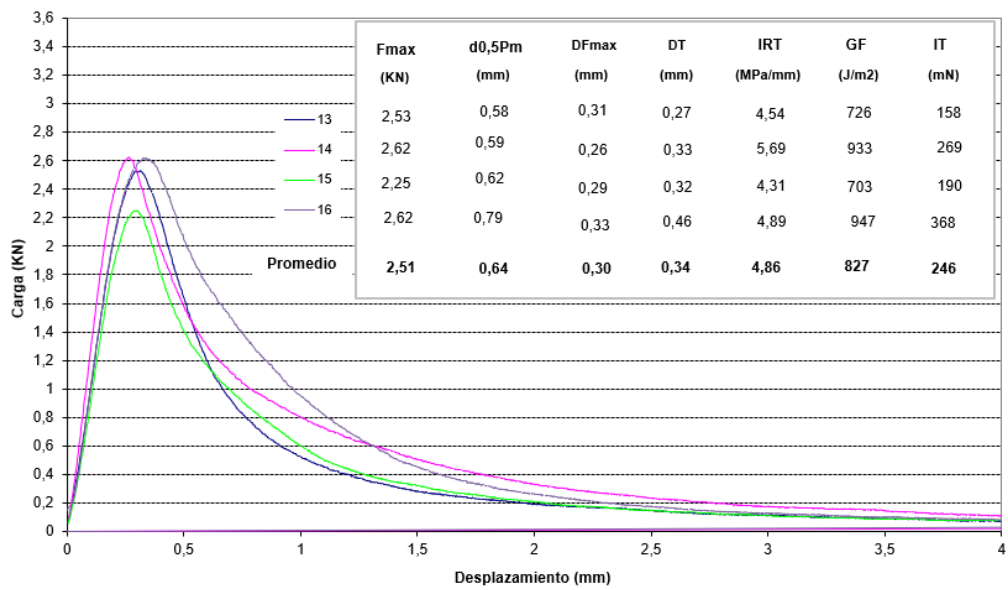




Ensayo Fénix a 5°C y 1 mm/min.

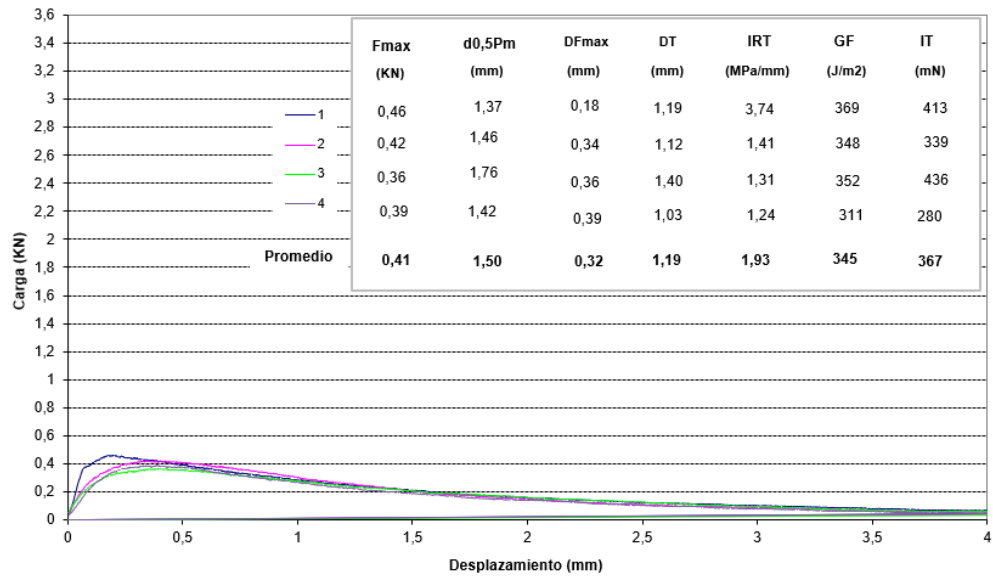


Ensayo Fénix a 20°C y 1 mm/min.

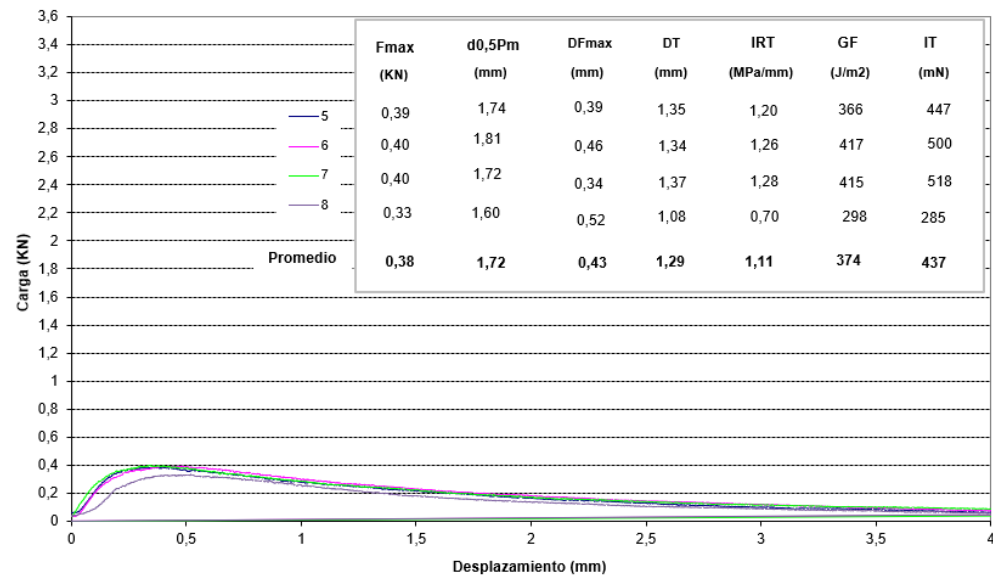


AC16 4cm 20°C

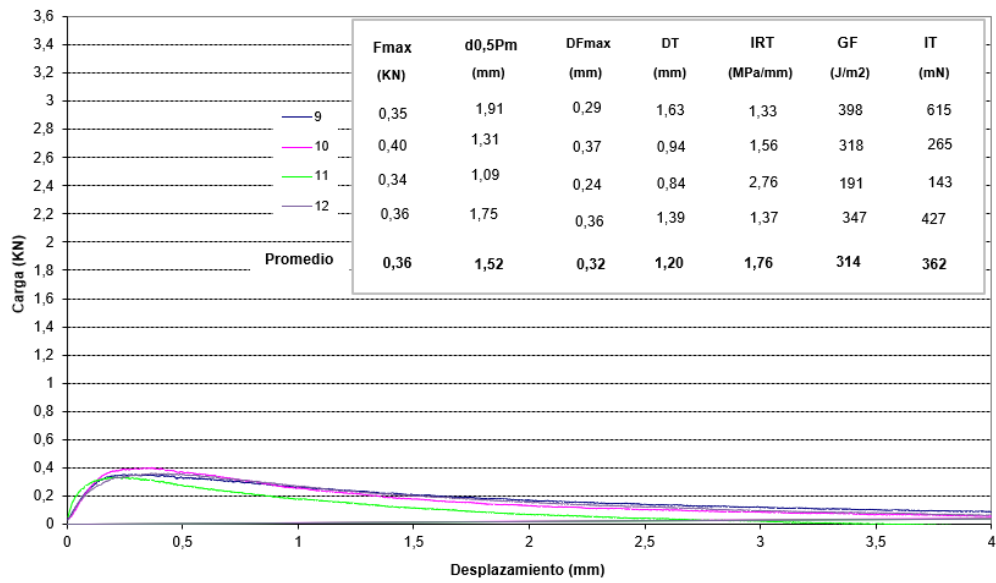
Ensayo Fénix a 20°C y 1 mm/min.



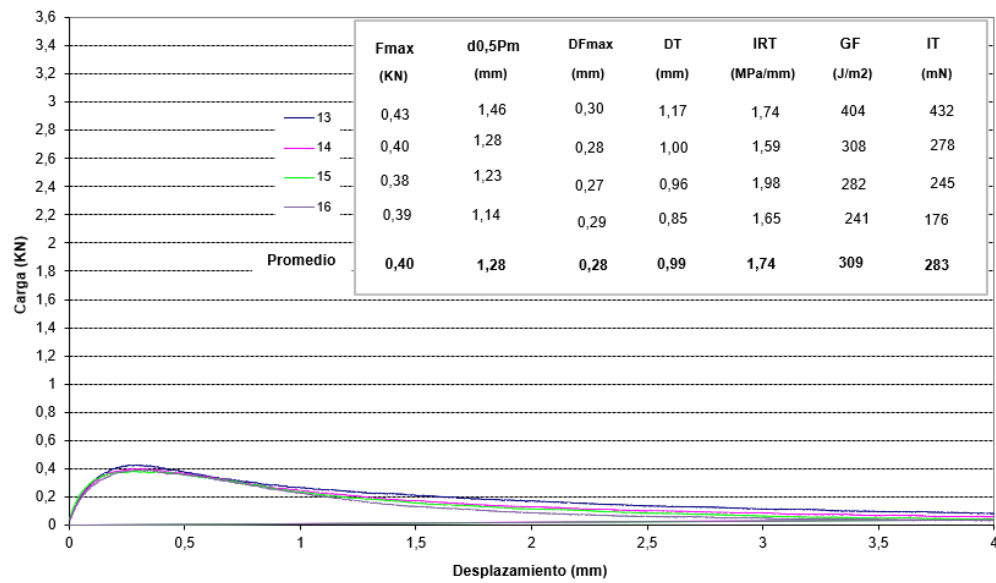
Ensayo Fénix a 20°C y 1 mm/min.



Ensayo Fénix a 20°C y 1 mm/min.

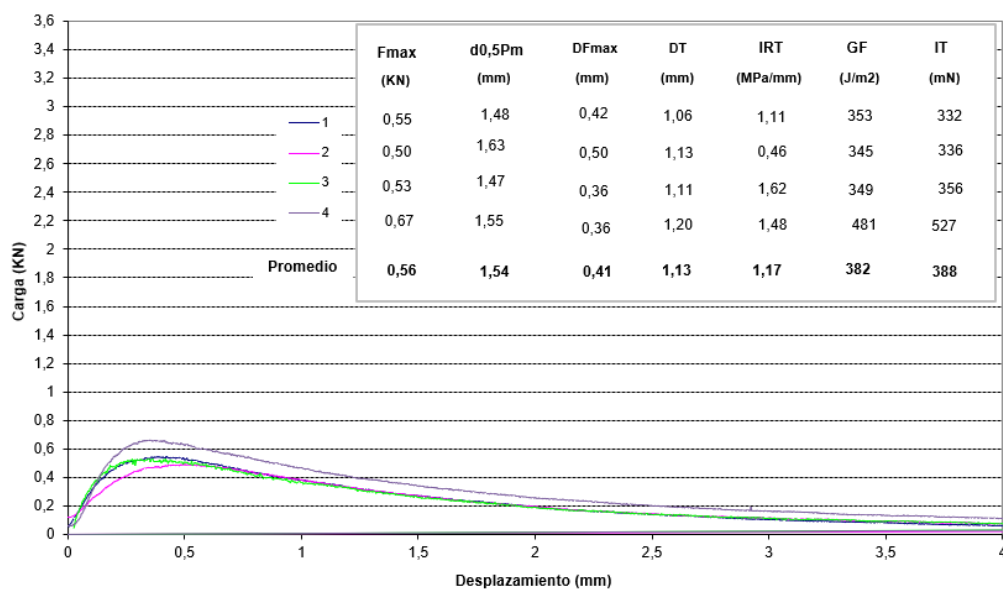


Ensayo Fénix a 20°C y 1 mm/min.

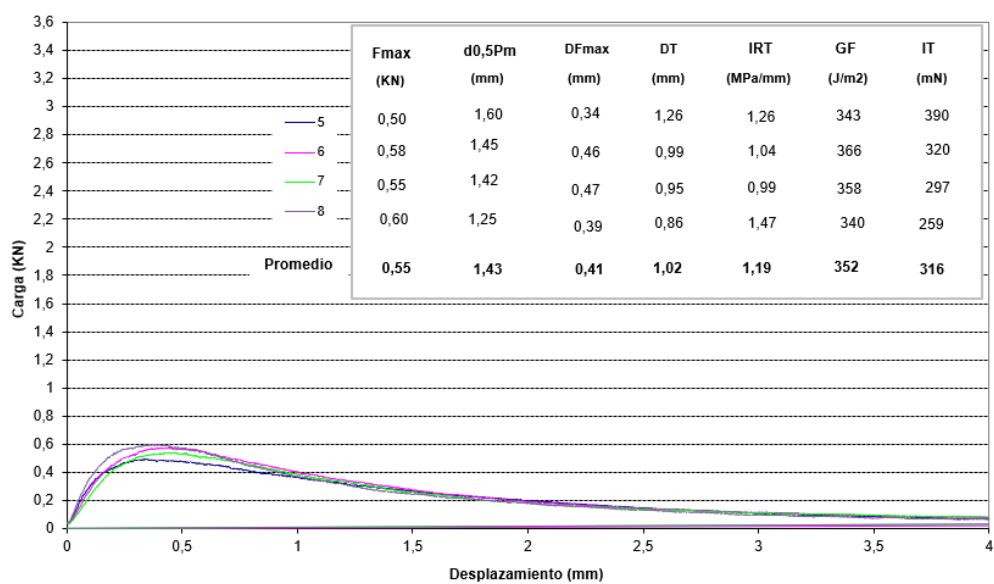


## AC16 6cm 20°C

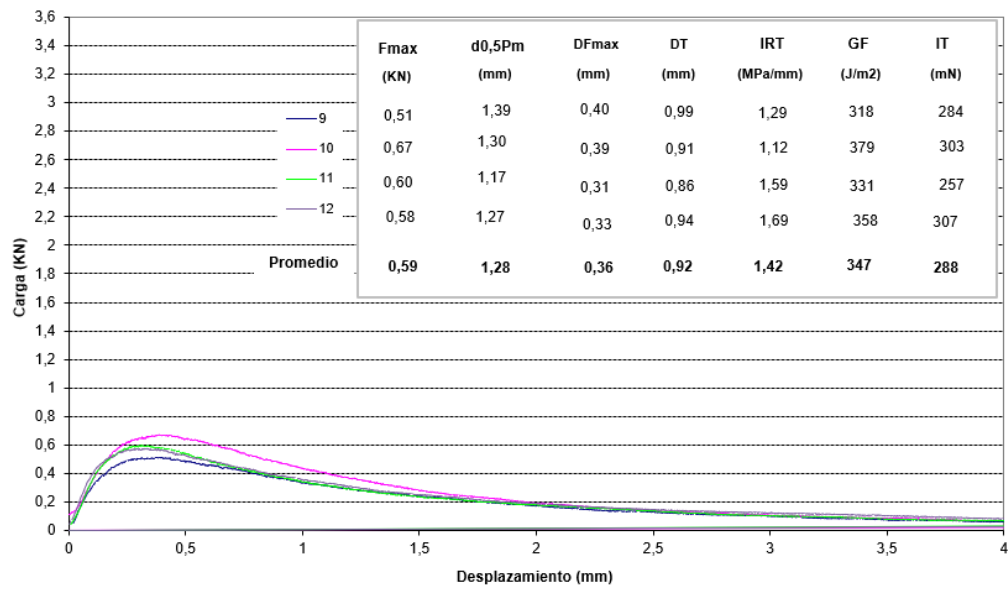
Ensayo Fénix a 20°C y 1 mm/min.



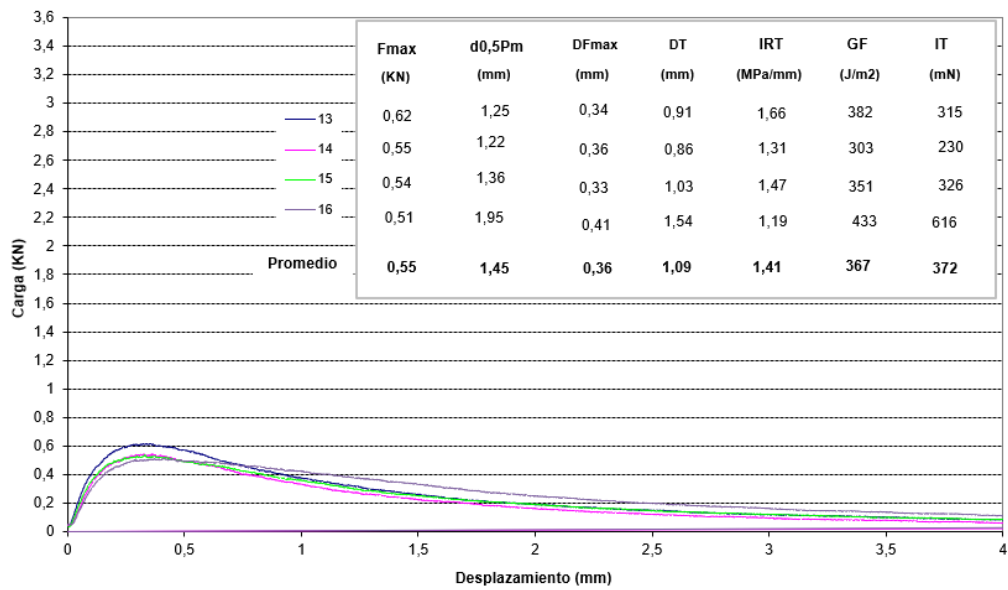
Ensayo Fénix a 20°C y 1 mm/min.



Ensayo Fénix a 20°C y 1 mm/min.

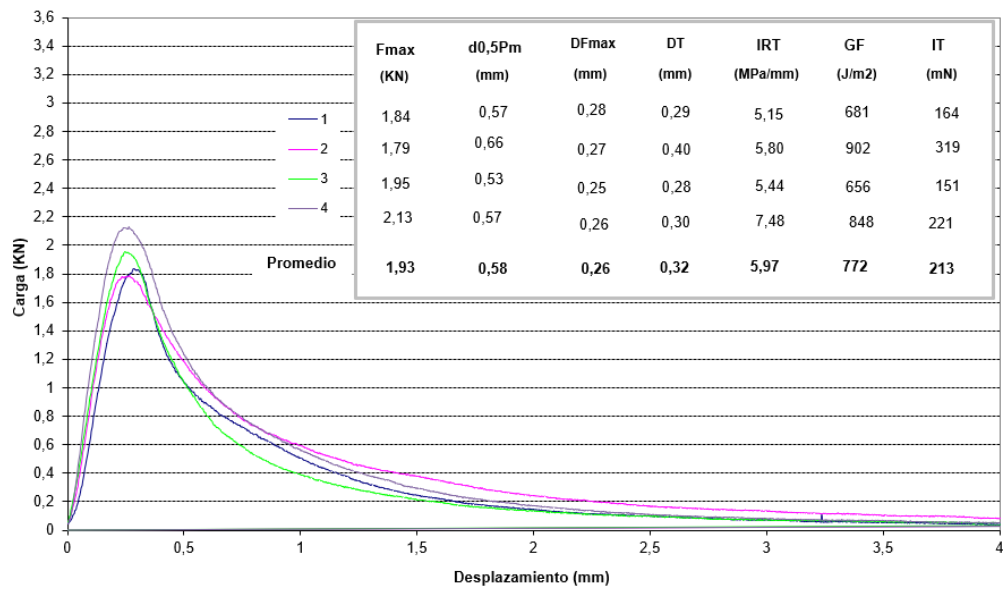


Ensayo Fénix a 20°C y 1 mm/min.

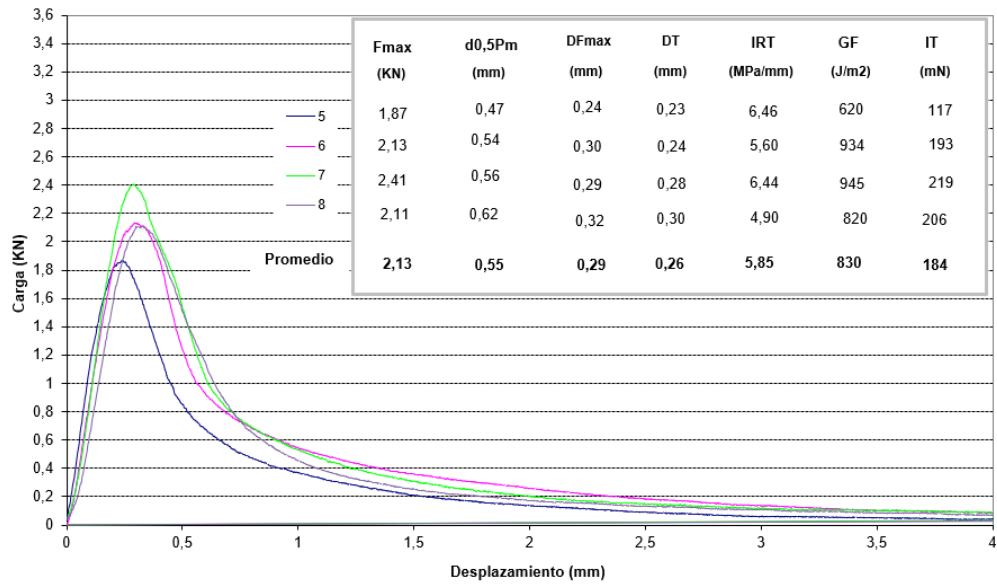


## AC22 4cm 5°C

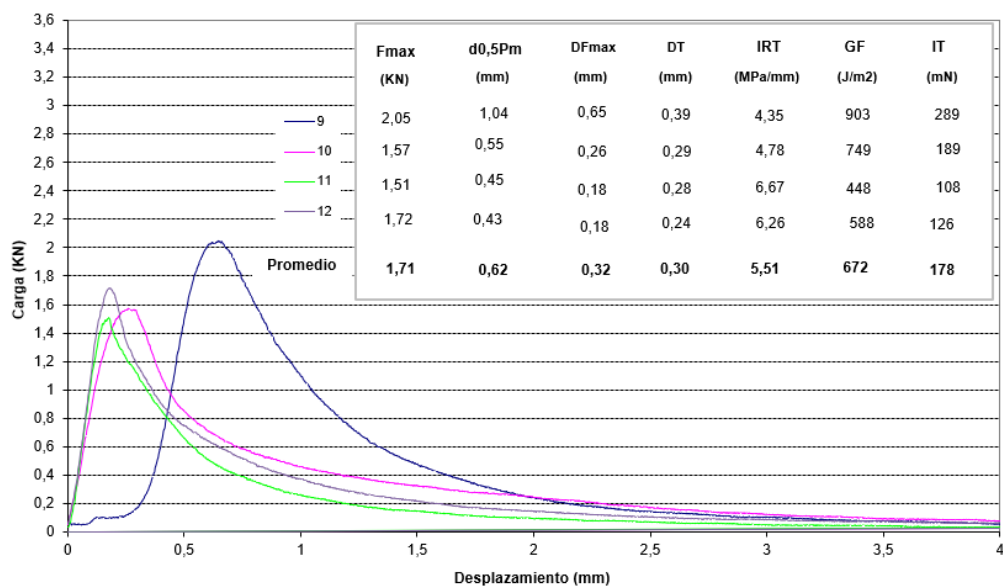
Ensayo Fénix a 5°C y 1 mm/min.



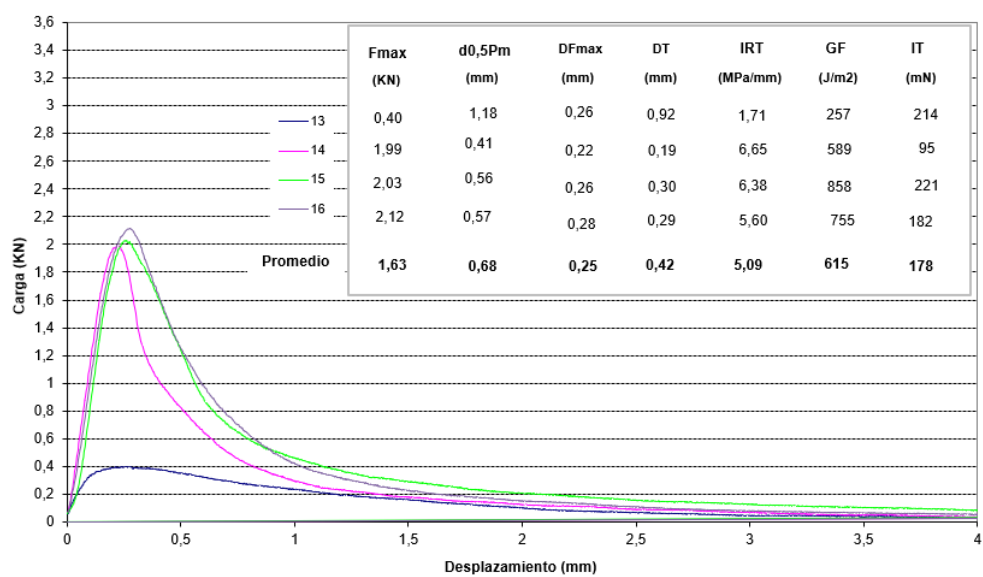
Ensayo Fénix a 5°C y 1 mm/min.



### Ensayo Fénix a 5°C y 1 mm/min.

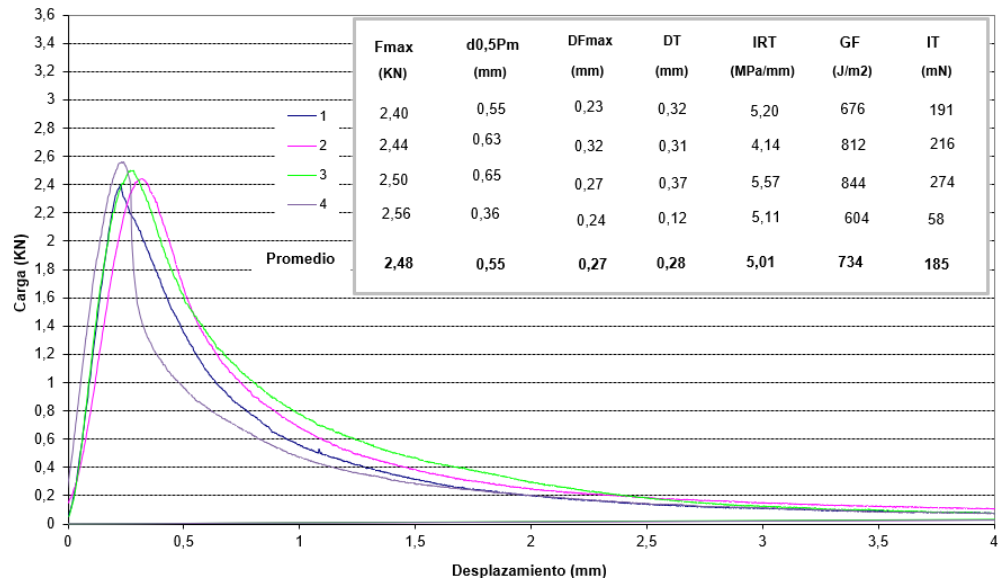


### Ensayo Fénix a 5°C y 1 mm/min.

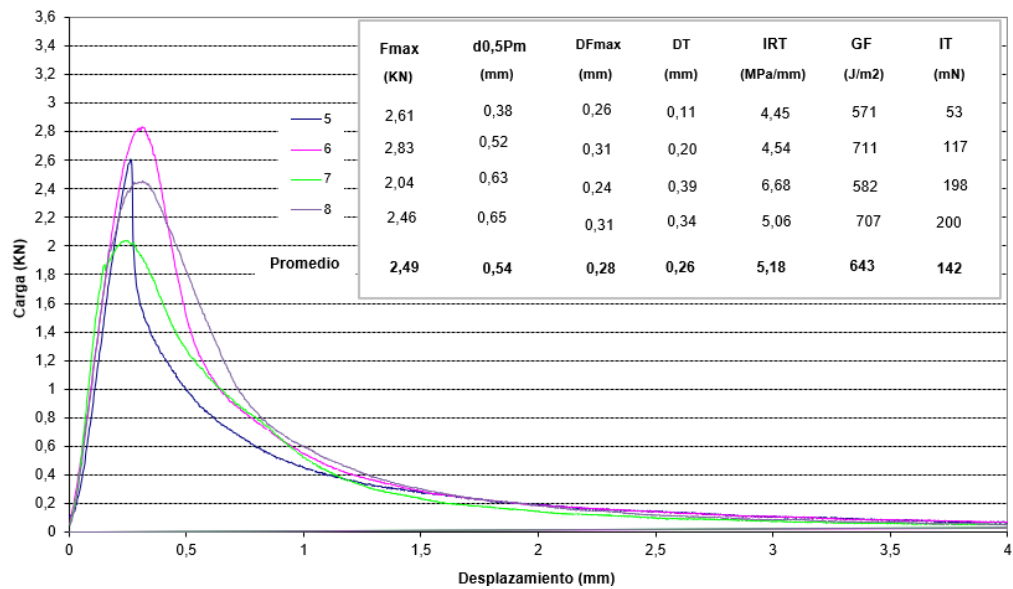


## AC22 6cm 5°C

Ensayo Fénix a 5°C y 1 mm/min.

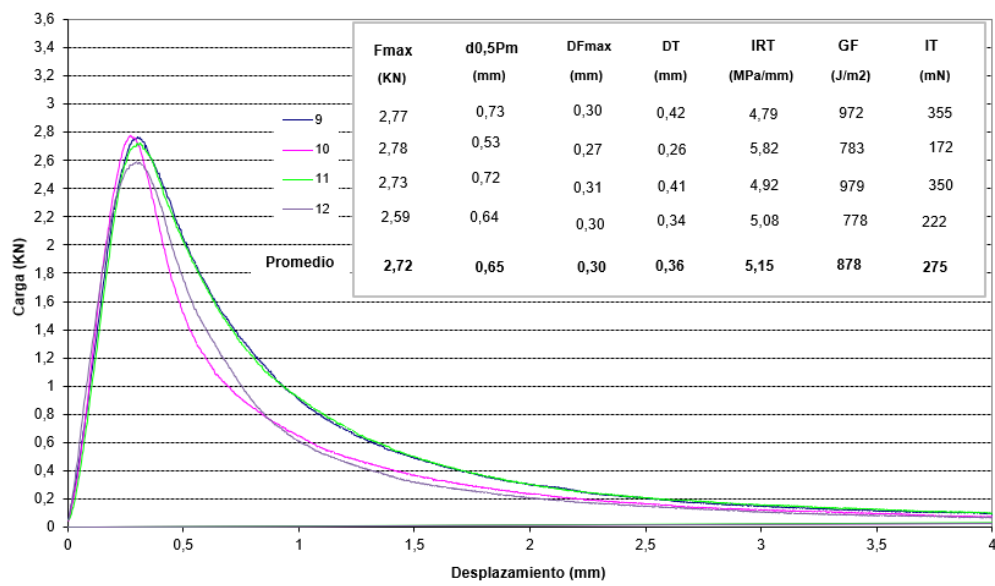


Ensayo Fénix a 5°C y 1 mm/min.

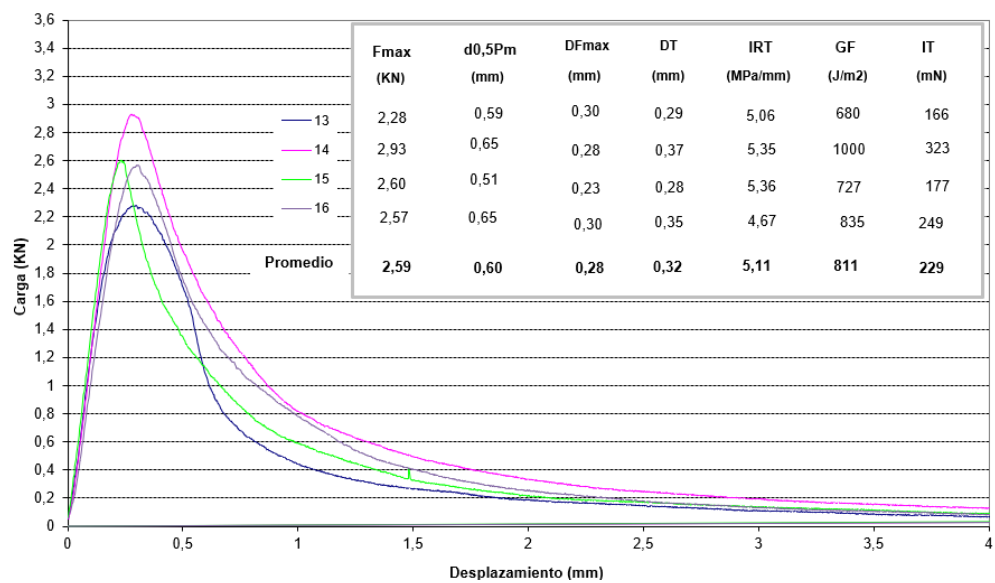




Ensayo Fénix a 5°C y 1 mm/min.

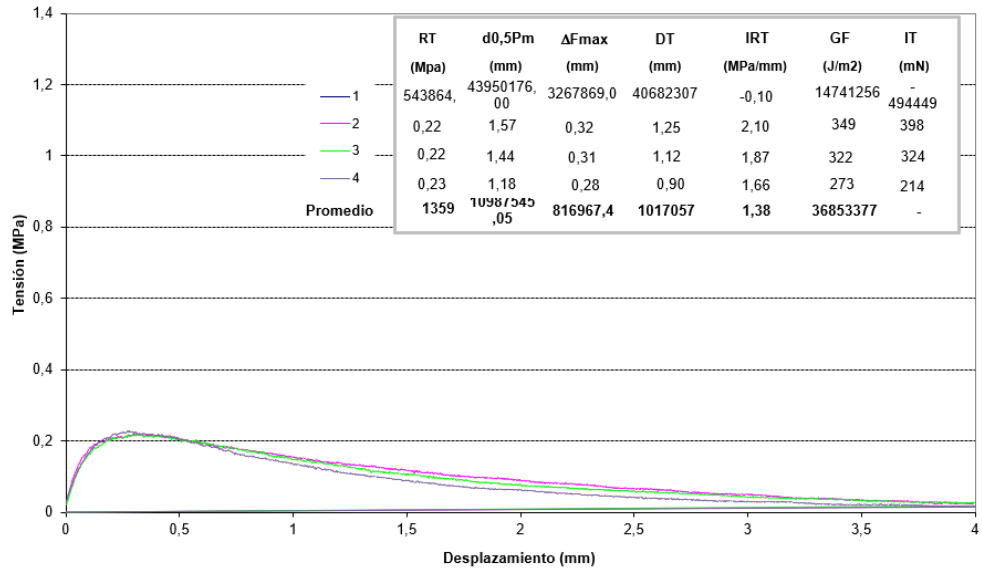


Ensayo Fénix a 5°C y 1 mm/min.

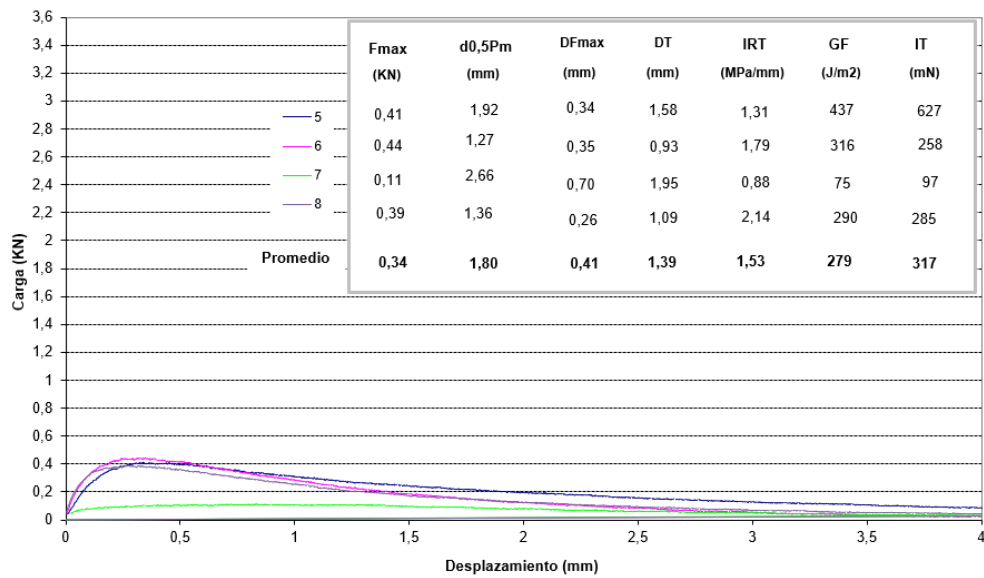


## AC22 4cm 20°C

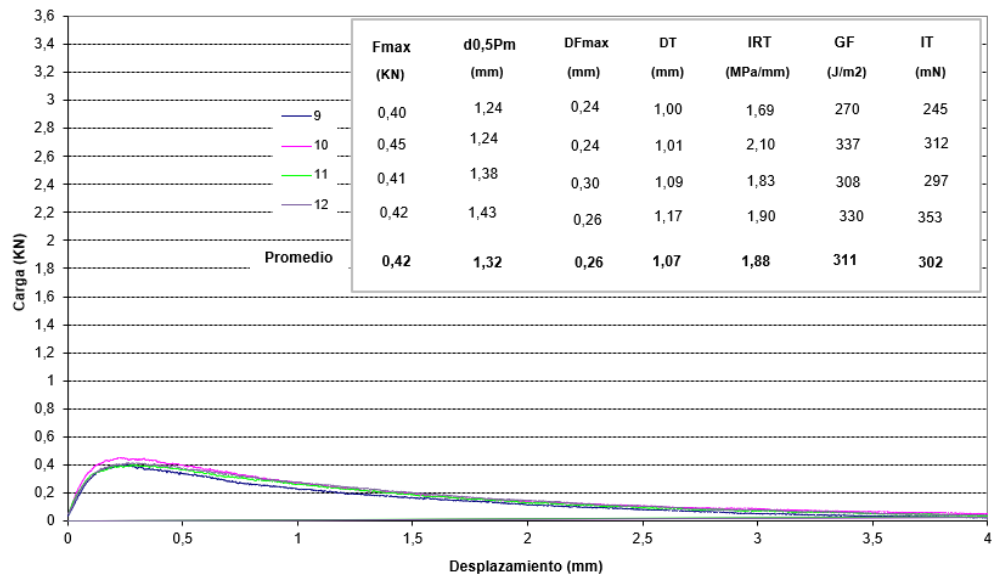
Ensayo Fénix a 20°C y 1 mm/min.



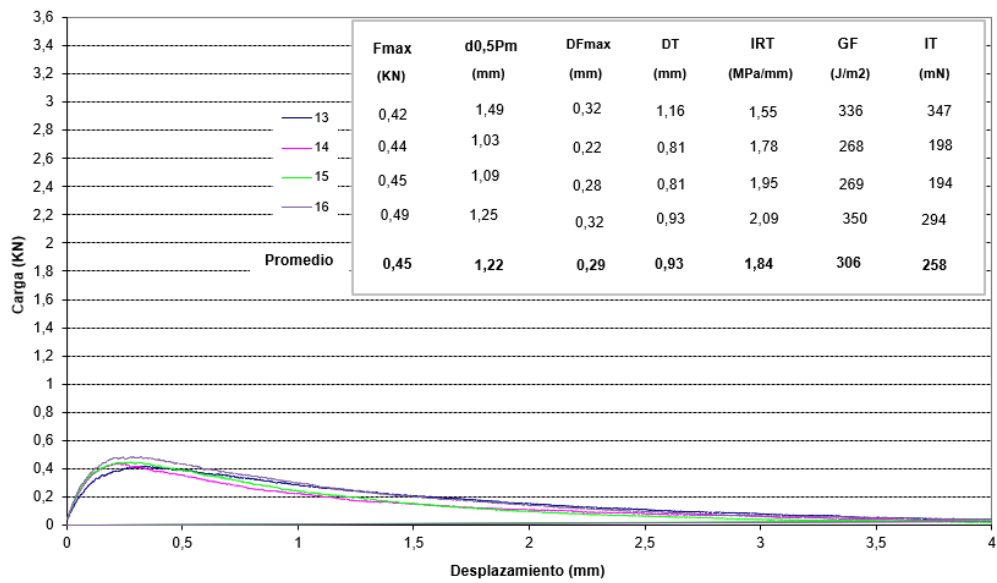
Ensayo Fénix a 20°C y 1 mm/min.



**Ensayo Fénix a 20°C y 1 mm/min.**

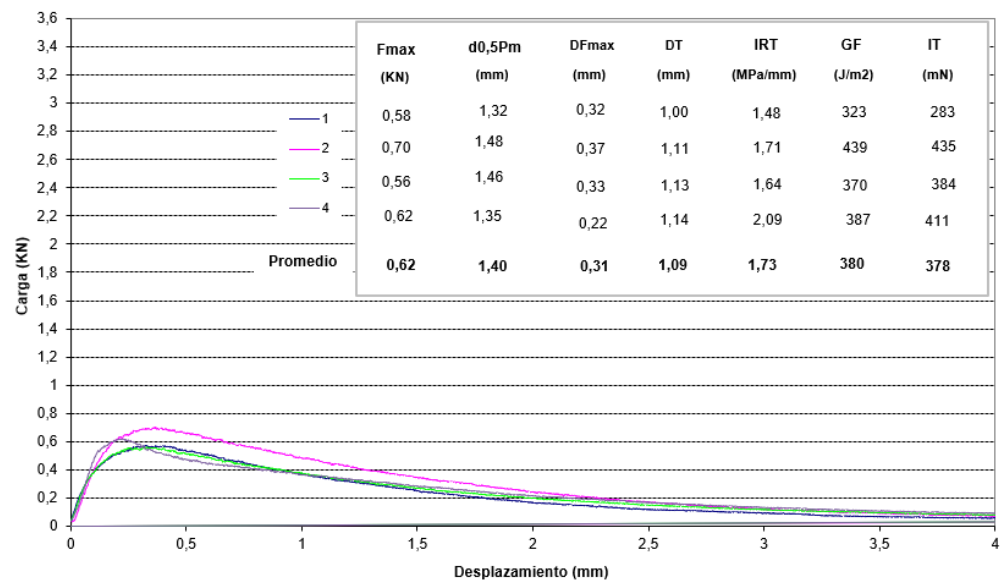


**Ensayo Fénix a 20°C y 1 mm/min.**

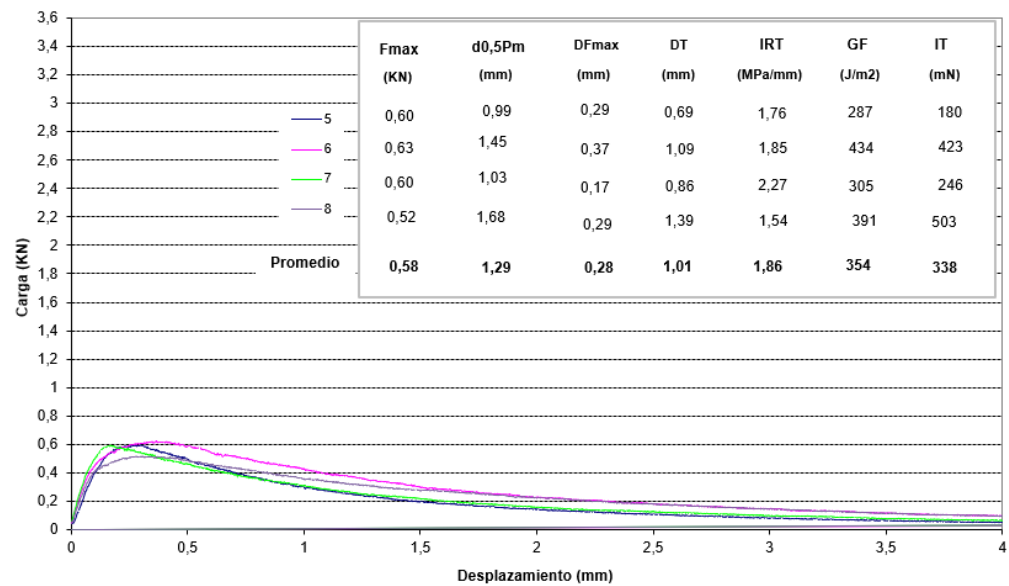


AC22 6cm 20°C

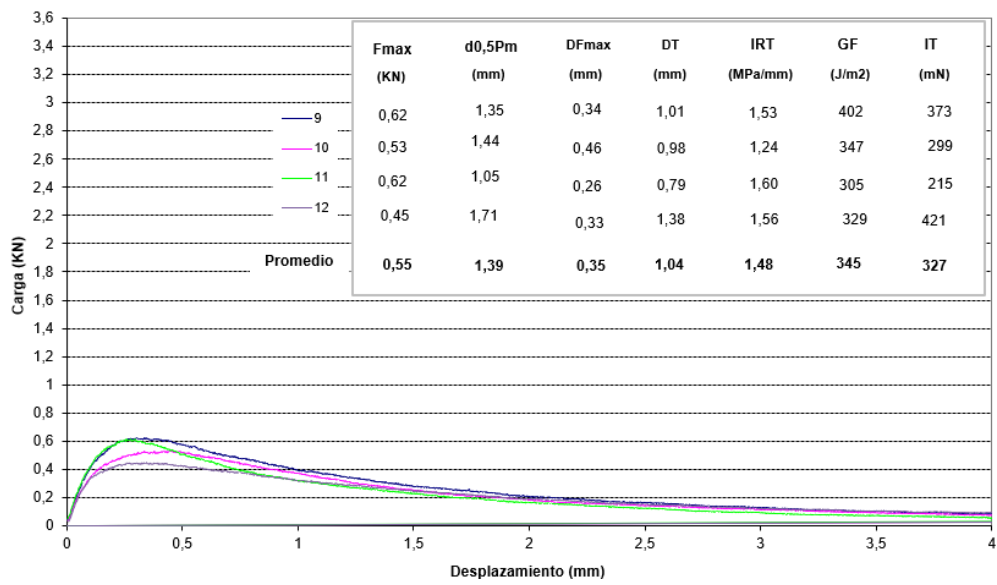
Ensayo Fénix a 20°C y 1 mm/min.



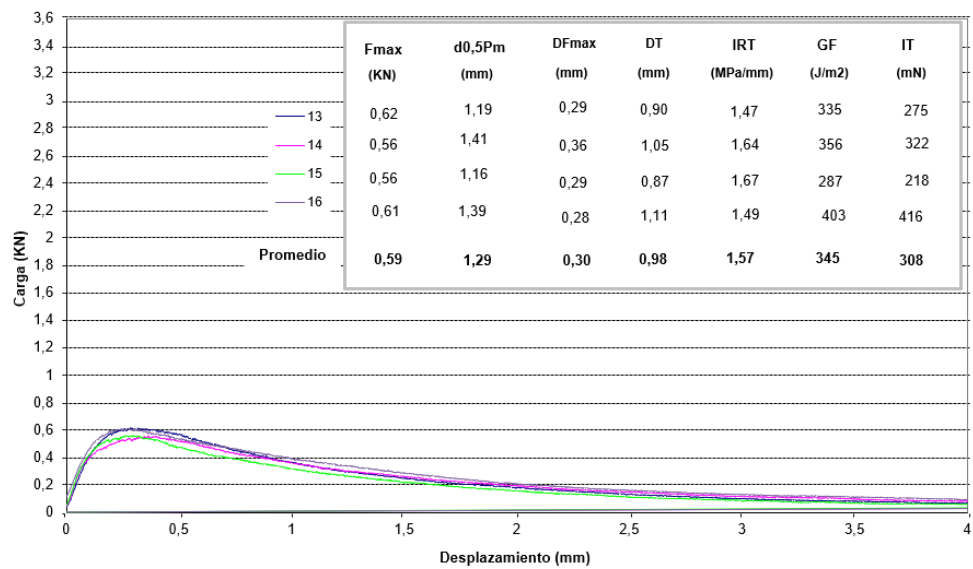
Ensayo Fénix a 20°C y 1 mm/min.



Ensayo Fénix a 20°C y 1 mm/min.



Ensayo Fénix a 20°C y 1 mm/min.



## ANEJO 3

### *Tablas resumen resultados Fénix*

Se representan las tablas resumen de los resultados obtenidos del ensayo Fénix, así como la media, la desviación estándar y el límite de repetibilidad. Se han descartado ya las probetas que no cumplían con la normalidad.

#### AC16 4cm 5°C

Nº probeta	H%	IRT/Af	GF	d0,5Pm
1	3,1659	6,1404	825,8101	0,6659
2	4,1520	5,1684	849,4818	0,6573
3	2,9293	7,0089	760,2738	0,5245
4	3,1659	5,7940	870,7580	0,6925
5	3,2054	5,4192	912,5150	0,6566
6	3,5209	5,9917	845,6577	0,6092
7	3,3631	6,8103	833,3926	0,5708
8	3,8759	5,6524	721,2123	0,5329
9	3,2842	5,7578	784,1297	0,7020
10	3,7576	5,6528	923,0766	0,6560
11	3,2448	5,2711	667,3794	0,6227
13	3,2054	5,3448	708,5704	0,5450
14	3,6787	6,0172	817,7901	0,6629
15	3,2448	5,8161	741,1240	0,6393
16	3,8759	5,4116	731,2678	0,7085
Media	3,445	5,817	799,5	0,6297
Desviación Estándar (Sr)	0,346	0,528	76,4	0,0607
Límite de repetibilidad ( r )	0,9688	1,4784	213,92	0,16996

### AC16 6cm 5°C

Nº probeta	H%	IRT/Af	GF	d0,5Pm
1	3,9548	4,7778	750,2605	0,6189
2	4,0731	4,3764	784,3996	0,5962
3	5,2170	4,2841	655,6506	0,5393
4	3,4815	5,1886	833,4021	0,5145
5	4,9409	4,8310	724,9753	0,5798
7	4,3492	4,9494	564,3229	0,5304
8	3,7576	5,6941	756,5348	0,6531
9	4,9409	4,7029	788,8366	0,6043
10	5,2959	4,5405	553,2698	0,5120
11	4,9803	5,5753	757,7196	0,5681
12	3,9942	5,3196	874,0709	0,6499
13	4,3492	4,5400	726,0512	0,5800
14	3,9153	5,6882	933,1985	0,5946
15	4,9014	4,3105	702,5847	0,6151
16	3,5604	4,8862	947,1379	0,7892
Media	4,381	4,911	757	0,5964
Desviación Estándar (Sr)	0,616	0,485	114	0,0692
Límite de repetibilidad ( r )	1,7248	1,358	319,2	0,19376

### AC16 4cm 20°C

Nº probeta	H%	IRT/Af	GF	d0,5Pm
2	4,1520	1,4124	347,5002	1,4610
3	2,9293	1,3140	352,1464	1,7611
4	3,1659	1,2393	310,5633	1,4176
5	3,2054	1,1971	366,0278	1,7436
6	3,5209	1,2609	417,1214	1,8067
7	3,3631	1,2792	415,3233	1,7182
8	3,8759	0,7000	296,3199	1,5503
9	3,2842	1,3310	398,1465	1,9145
10	3,7576	1,5648	318,1347	1,3122
11	3,2448	2,7646	191,2382	1,0850
12	3,5209	1,3741	347,0230	1,7513
13	3,2054	1,7369	403,6282	1,4638
14	3,6787	1,5899	307,9451	1,2795
15	3,2448	1,9825	282,0145	1,2307
16	3,8759	1,6542	241,3563	1,1371
Media	3,4683	1,4934	332,9659	1,5089
Desviación Estándar (Sr)	0,338	0,456	64,8	0,264
Límite de repetibilidad ( r )	0,9464	1,2768	181,44	0,7392



### AC16 6cm 20°C

Nº probeta	H%	IRT/Af	GF	d0,5Pm
1	3,9548	1,1132	353,0529	1,4844
3	5,2170	1,6232	348,9725	1,4749
5	4,9409	1,2584	343,0965	1,6038
6	3,8365	1,0433	365,9987	1,4496
7	4,3492	0,9931	357,7034	1,4222
8	3,7576	1,4731	339,5886	1,2457
9	4,9409	1,2902	318,3794	1,3901
10	5,2959	1,1189	379,2528	1,2960
11	4,9803	1,5932	330,7459	1,1732
12	3,9942	1,6909	358,0079	1,2657
13	4,3492	1,6612	382,0973	1,2490
14	3,9153	1,3084	302,8466	1,2194
15	4,9014	1,4745	351,1385	1,3646
Media	4,4949	1,3570	348,5293	1,3568
Desviación Estándar (Sr)	0,567	0,245	22,4	0,127
Límite de repetibilidad ( r )	1,5876	0,686	62,72	0,3556

### AC22 4cm 5°C

Nº probeta	H%	IRT/Af	GF	d0,5Pm
1	3,5978	5,1508	680,5126	0,5701
2	3,2059	5,7989	902,4623	0,6616
3	3,2059	5,4383	656,2666	0,5252
4	3,5978	7,4812	848,1563	0,5675
5	3,9897	6,4599	620,4726	0,4662
6	3,2059	5,5961	933,6553	0,5398
7	3,2059	6,4412	945,3120	0,5642
8	3,5978	4,9038	820,2322	0,6200
9	2,8140	4,3463	889,3206	0,7564
10	3,5978	4,7819	748,7494	0,5461
11	2,8140	6,6665	448,0841	0,4528
12	3,5978	6,2624	587,5238	0,4261
14	3,2059	6,6484	589,0708	0,4110
15	3,2059	6,3770	858,4800	0,5579
16	3,2059	5,6041	754,8270	0,5668
Media	3,337	5,864	752	0,5488
Desviación Estándar (Sr)	0,32	0,854	150	0,0899
Límite de repetibilidad ( r )	0,896	2,3912	420	0,25172

### AC22 6cm 5°C

Nº probeta	H%	IRT/Af	GF	d0,5Pm
1	3,5586	5,1981	675,9164	0,5522
2	3,1667	4,1424	812,3297	0,6343
3	3,3627	5,5674	844,0635	0,6474
4	3,4411	5,1144	606,0653	0,4073
5	3,5586	4,4460	571,0292	0,3765
6	3,0884	4,5359	710,8902	0,5159
8	2,8924	5,0604	706,5781	0,6513
9	3,6762	4,7909	971,8644	0,7254
10	3,2843	5,8199	783,1687	0,5313
11	3,8329	4,9199	979,4244	0,7239
12	3,5194	5,0787	777,7651	0,6389
13	3,4802	5,0617	680,0184	0,5888
14	3,4411	5,3484	1000,0233	0,6504
15	3,8721	5,3605	727,3686	0,5130
16	3,4411	4,6737	835,0651	0,6547
Media	3,441	5,008	779	0,587
Desviación Estándar (Sr)	0,262	0,441	131	0,104
Límite de repetibilidad ( r )	0,7336	1,2348	366,8	0,2912

**AC22 4cm 20°C**

<b>Nº probeta</b>	<b>H%</b>	<b>IRT/Af</b>	<b>GF</b>	<b>d0,5Pm</b>
<b>2</b>	3,2059	2,0987	348,9260	1,5676
<b>3</b>	3,2059	1,8673	322,1545	1,4351
<b>4</b>	3,5978	1,6603	272,8941	1,1811
<b>6</b>	3,2059	1,7864	316,0100	1,2735
<b>8</b>	3,5978	2,1371	289,5242	1,3569
<b>9</b>	2,8140	1,6936	269,5568	1,2396
<b>10</b>	3,5978	2,0952	337,4800	1,2440
<b>11</b>	2,8140	1,8288	307,7921	1,3840
<b>12</b>	3,5978	1,9016	329,7781	1,4315
<b>13</b>	3,9897	1,5461	336,2196	1,4856
<b>14</b>	3,2059	1,7847	267,9376	1,0338
<b>15</b>	3,2059	1,9497	269,0569	1,0888
<b>16</b>	3,2059	2,0850	350,2468	1,2529
<b>Media</b>	3,3265	1,8796	309,0444	1,3057
<b>Desviación Estándar (Sr)</b>	0,335	0,188	31,7	0,156
<b>Límite de repetibilidad ( r )</b>	0,938	0,5264	88,76	0,4368

**AC22 6cm 20°C**

<b>Nº probeta</b>	<b>H%</b>	<b>IRT/Af</b>	<b>GF</b>	<b>d0,5Pm</b>
<b>1</b>	3,5586	1,4802	323,2769	1,3208
<b>2</b>	3,1667	1,7147	438,9811	1,4774
<b>3</b>	3,3627	1,6370	369,8347	1,4591
<b>4</b>	3,4411	2,0859	387,0445	1,3536
<b>5</b>	3,5586	1,7577	286,6456	0,9892
<b>6</b>	3,0884	1,8539	433,9329	1,4538
<b>7</b>	3,6762	2,2710	304,5977	1,0344
<b>8</b>	2,8924	1,5398	391,0304	1,6845
<b>9</b>	3,6762	1,5256	401,6086	1,3496
<b>10</b>	3,2843	1,2384	346,5545	1,4411
<b>11</b>	3,8329	1,5959	304,7347	1,0493
<b>12</b>	3,5194	1,5627	328,6895	1,7141
<b>13</b>	3,4802	1,4659	335,3834	1,1902
<b>14</b>	3,4411	1,6439	355,9184	1,4096
<b>15</b>	3,8721	1,6666	286,7376	1,1606
<b>16</b>	3,4411	1,4898	403,1202	1,3909
<b>Media</b>	3,4557	1,6581	356,1307	1,3424
<b>Desviación Estándar (Sr)</b>	0,26	0,249	49,6	0,213
<b>Límite de repetibilidad ( r )</b>	0,728	0,6972	138,88	0,5964

ANEJO 4

Test de Levene

- Diferente altura de probeta:

AC-16S 4cm 5°C vs AC-16S 6cm 5°C

Test for Equal Variances: H%, H%\_1  
Method

Null hypothesis All variances are equal  
Alternative hypothesis At least one variance is different  
Significance level  $\alpha = 0.05$   
*F method is used. This method is accurate for normal data only.*

95% Bonferroni Confidence Intervals for Standard Deviations

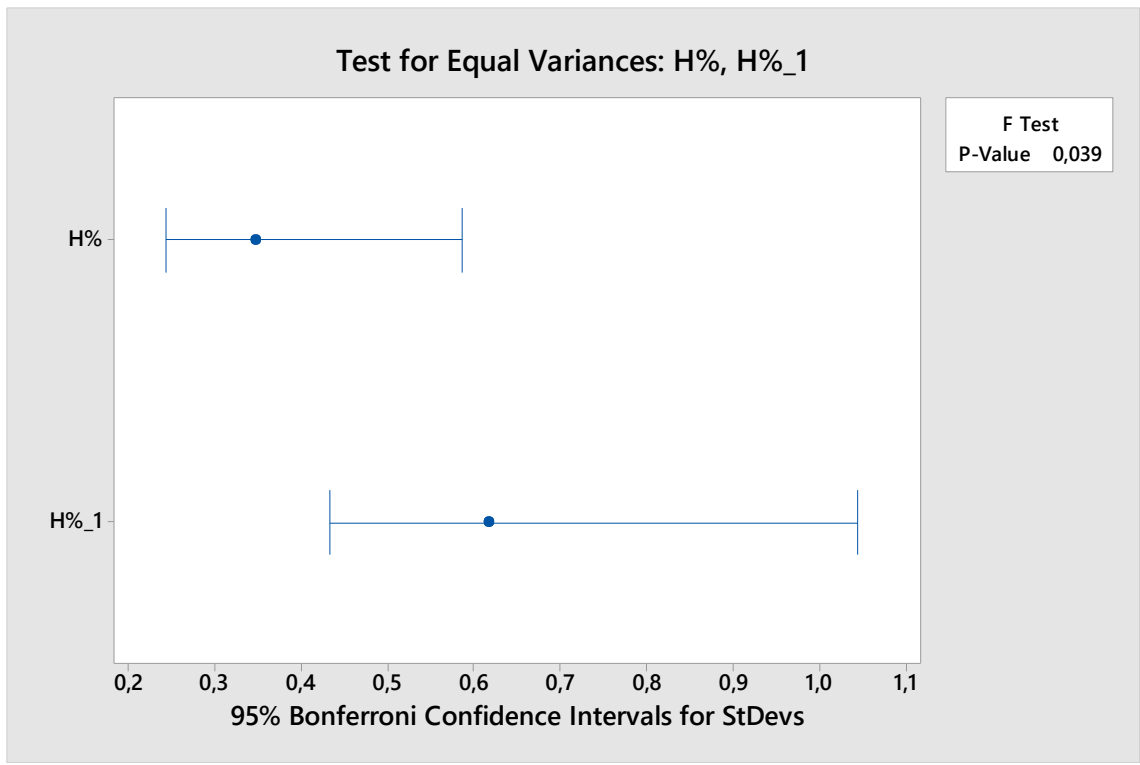
Sample	N	StDev	CI
H%	15	0.346266	(0.243023, 0.58690)
H%_1	15	0.615804	(0.432195, 1.04376)

Individual confidence level = 97.5%

Tests

Method	Test	
	Statistic	P-Value
F	0.32	0.039

Test for Equal Variances: H%, H%\_1



# Test for Equal Variances: IRT/Af, IRT/Af\_1

## Method

Null hypothesis            All variances are equal

Alternative hypothesis    At least one variance is different

Significance level         $\alpha = 0.05$

*F method is used. This method is accurate for normal data only.*

## 95% Bonferroni Confidence Intervals for Standard Deviations

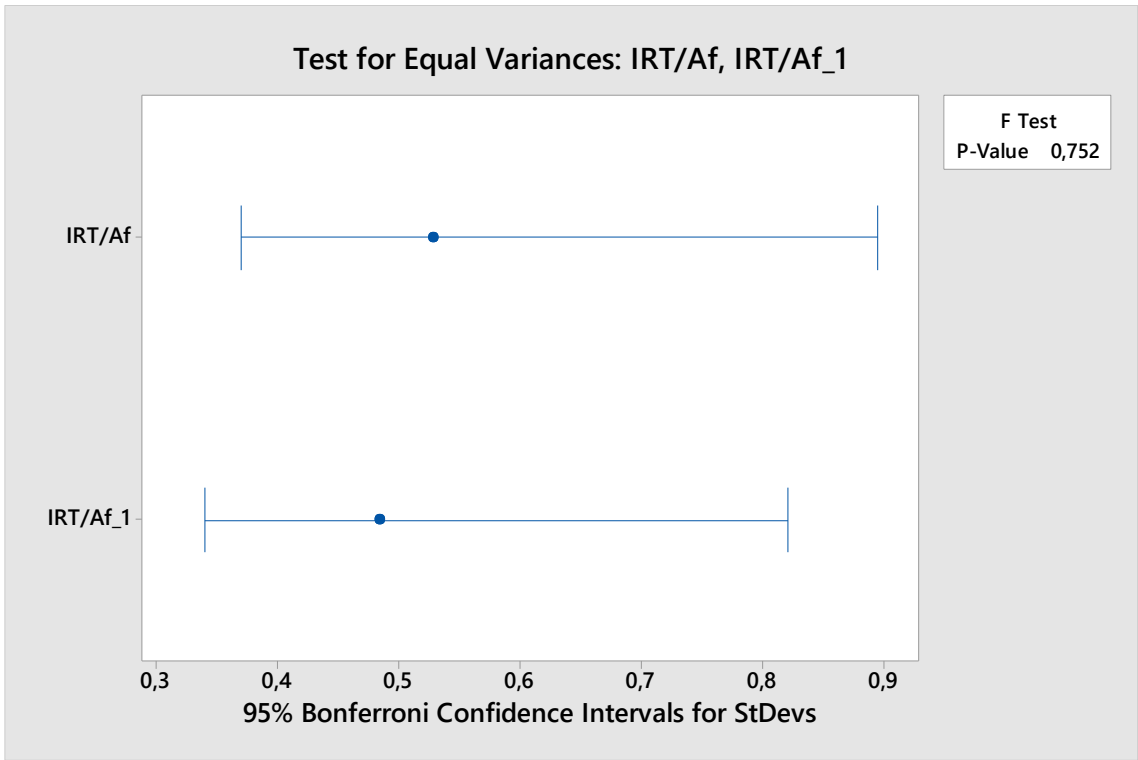
Sample	N	StDev	CI
IRT/Af	15	0.528124	(0.370658, 0.895142)
IRT/Af_1	15	0.484505	(0.340044, 0.821210)

*Individual confidence level = 97.5%*

## Tests

		Test
Method	Statistic	P-Value
F	1.19	0.752

## Test for Equal Variances: IRT/Af, IRT/Af\_1



# Test for Equal Variances: GF, GF\_1

## Method

Null hypothesis            All variances are equal

Alternative hypothesis    At least one variance is different

Significance level         $\alpha = 0.05$

*F method is used. This method is accurate for normal data only.*

## 95% Bonferroni Confidence Intervals for Standard Deviations

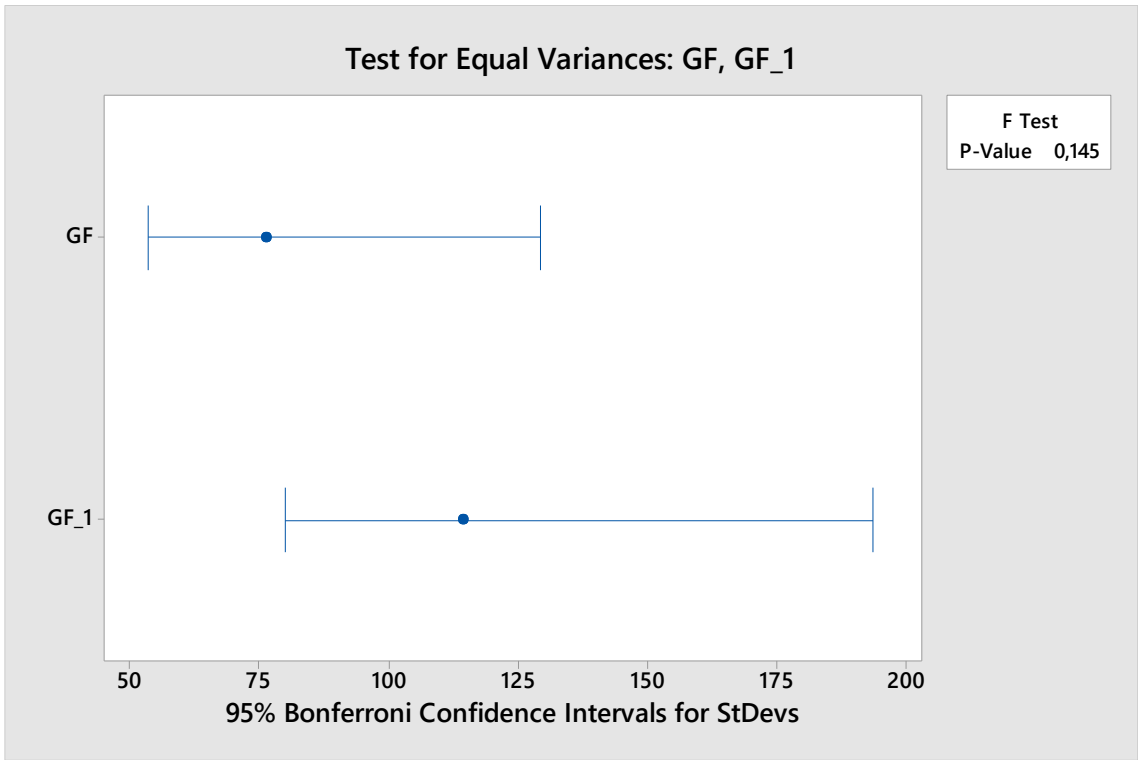
Sample	N	StDev	CI
GF	15	76.353	(53.5874, 129.414)
GF_1	15	114.142	(80.1093, 193.465)

Individual confidence level = 97.5%

## Tests

Test		
Method	Statistic	P-Value
F	0.45	0.145

## Test for Equal Variances: GF, GF\_1





# Test for Equal Variances: d0,5Pm, d0,5Pm\_1

## Method

Null hypothesis            All variances are equal

Alternative hypothesis    At least one variance is different

Significance level         $\alpha = 0.05$

*F method is used. This method is accurate for normal data only.*

## 95% Bonferroni Confidence Intervals for Standard Deviations

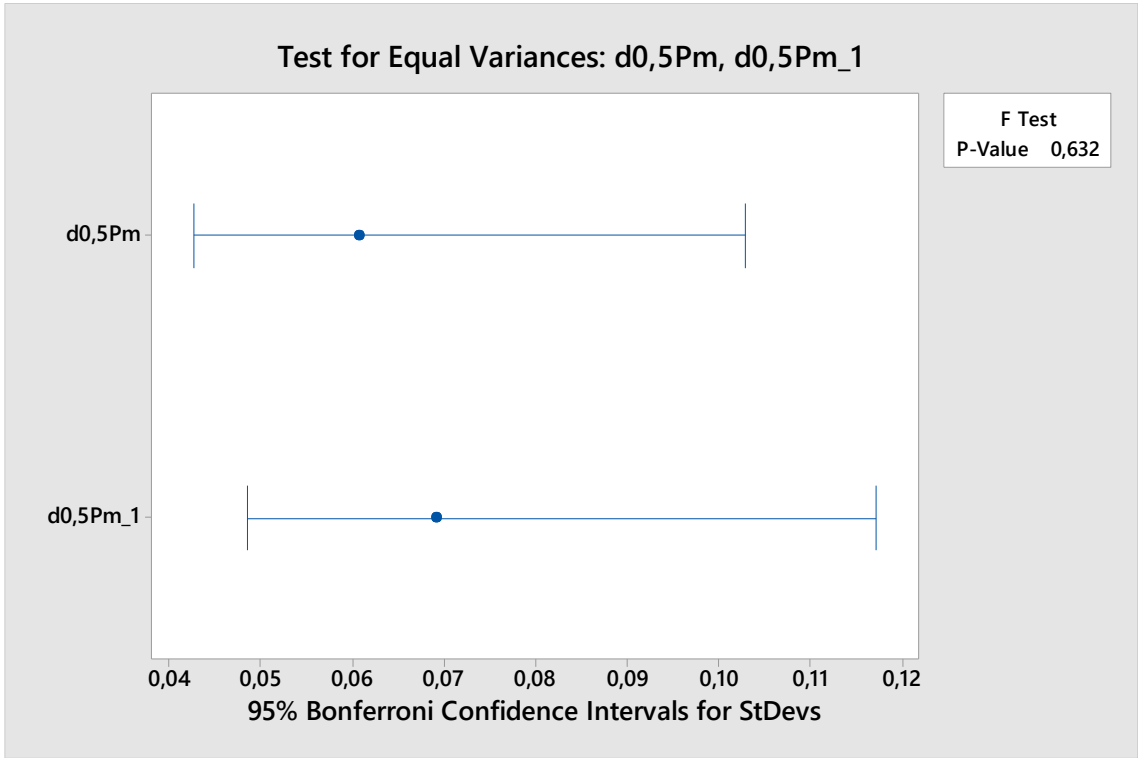
Sample	N	StDev	CI
d0,5Pm	15	0.0607075	(0.0426068, 0.102896)
d0,5Pm_1	15	0.0691611	(0.0485399, 0.117224)

Individual confidence level = 97.5%

## Tests

Test		
Method	Statistic	P-Value
F	0.77	0.632

## Test for Equal Variances: d0,5Pm, d0,5Pm\_1



## AC-16S 4cm 20°C vs AC-16S 6cm 20°C

### Test for Equal Variances: H%, H%\_1 Method

Null hypothesis All variances are equal  
Alternative hypothesis At least one variance is different  
Significance level  $\alpha = 0.05$   
*F method is used. This method is accurate for normal data only.*

### 95% Bonferroni Confidence Intervals for Standard Deviations

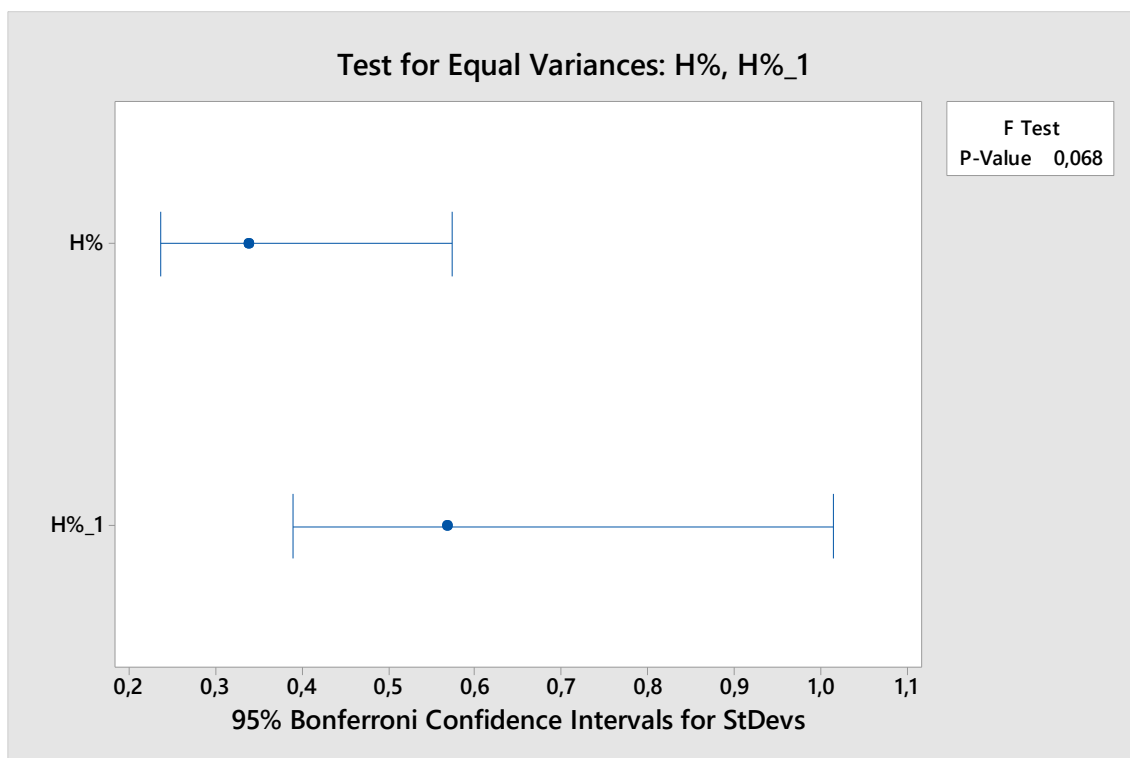
Sample	N	StDev	CI
H%	15	0.337885	(0.237140, 0.57270)
H%_1	13	0.567126	(0.388813, 1.01417)

Individual confidence level = 97.5%

### Tests

Method	Test	
	Statistic	P-Value
F	0.35	0.068

### Test for Equal Variances: H%, H%\_1



# Test for Equal Variances: IRT/Af, IRT/Af\_1

## Method

Null hypothesis            All variances are equal

Alternative hypothesis    At least one variance is different

Significance level         $\alpha = 0.05$

*F method is used. This method is accurate for normal data only.*

## 95% Bonferroni Confidence Intervals for Standard Deviations

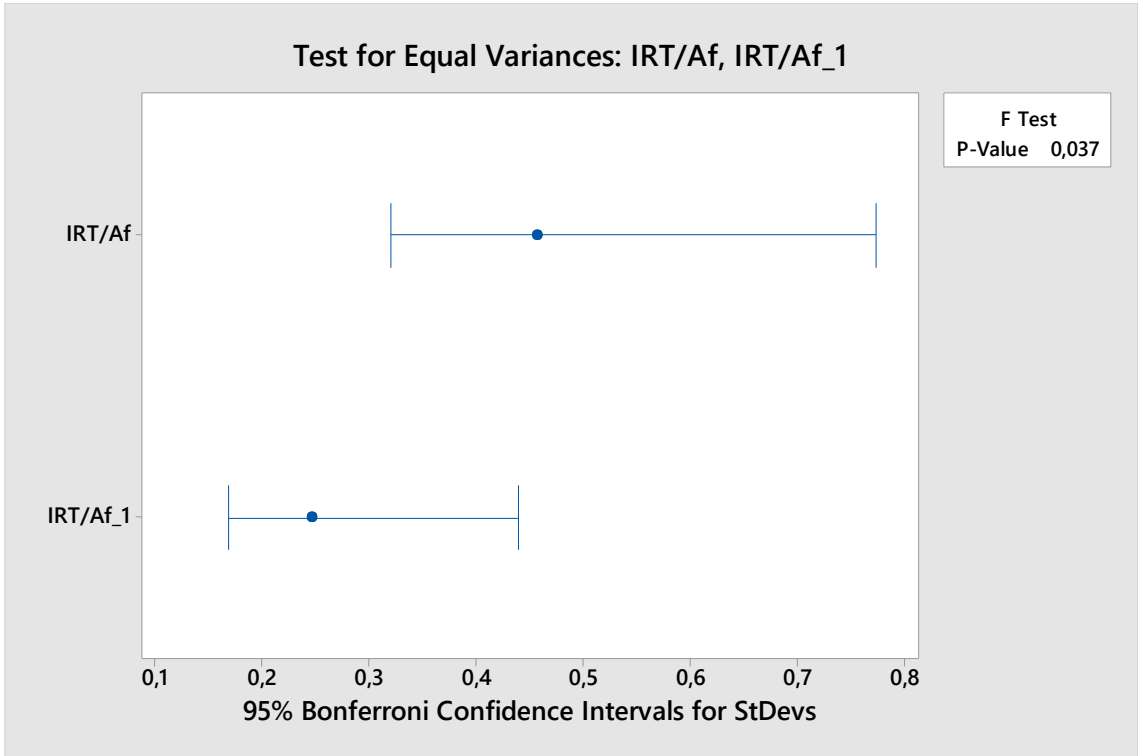
Sample	N	StDev	CI
IRT/Af	15	0.456376	(0.320302, 0.773533)
IRT/Af_1	13	0.245183	(0.168094, 0.438453)

Individual confidence level = 97.5%

## Tests

Test		
Method	Statistic	P-Value
F	3.46	0.037

## Test for Equal Variances: IRT/Af, IRT/Af\_1



# Test for Equal Variances: GF, GF\_1

## Method

Null hypothesis            All variances are equal

Alternative hypothesis    At least one variance is different

Significance level         $\alpha = 0.05$

*F method is used. This method is accurate for normal data only.*

## 95% Bonferroni Confidence Intervals for Standard Deviations

Sample	N	StDev	CI
GF	15	64.7756	(45.4620, 109.791)
GF_1	13	22.3589	(15.3289, 39.984)

Individual confidence level = 97.5%

## Tests

Test		
Method	Statistic	P-Value
F	8.39	0.001

## Test for Equal Variances: GF, GF\_1



# Test for Equal Variances: d0,5Pm, d0,5Pm\_1

## Method

Null hypothesis            All variances are equal

Alternative hypothesis    At least one variance is different

Significance level         $\alpha = 0.05$

*F method is used. This method is accurate for normal data only.*

## 95% Bonferroni Confidence Intervals for Standard Deviations

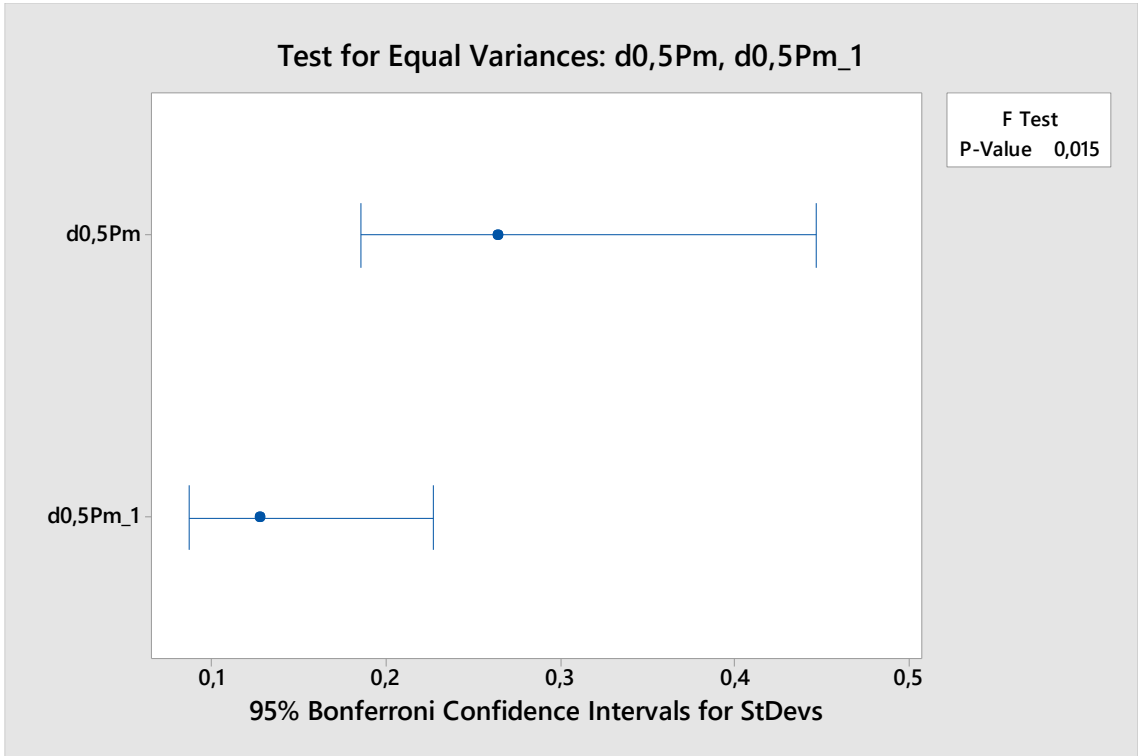
Sample	N	StDev	CI
d0,5Pm	15	0.263961	(0.185258, 0.447400)
d0,5Pm_1	13	0.127102	(0.087140, 0.227293)

*Individual confidence level = 97.5%*

## Tests

Test		
Method	Statistic	P-Value
F	4.31	0.015

## Test for Equal Variances: d0,5Pm, d0,5Pm\_1



## AC-22S 4cm 5°C vs AC-22S 6cm 5°C

### Test for Equal Variances: H%, H%\_1

#### Method

Null hypothesis All variances are equal  
 Alternative hypothesis At least one variance is different  
 Significance level  $\alpha = 0.05$

#### 95% Bonferroni Confidence Intervals for Standard Deviations

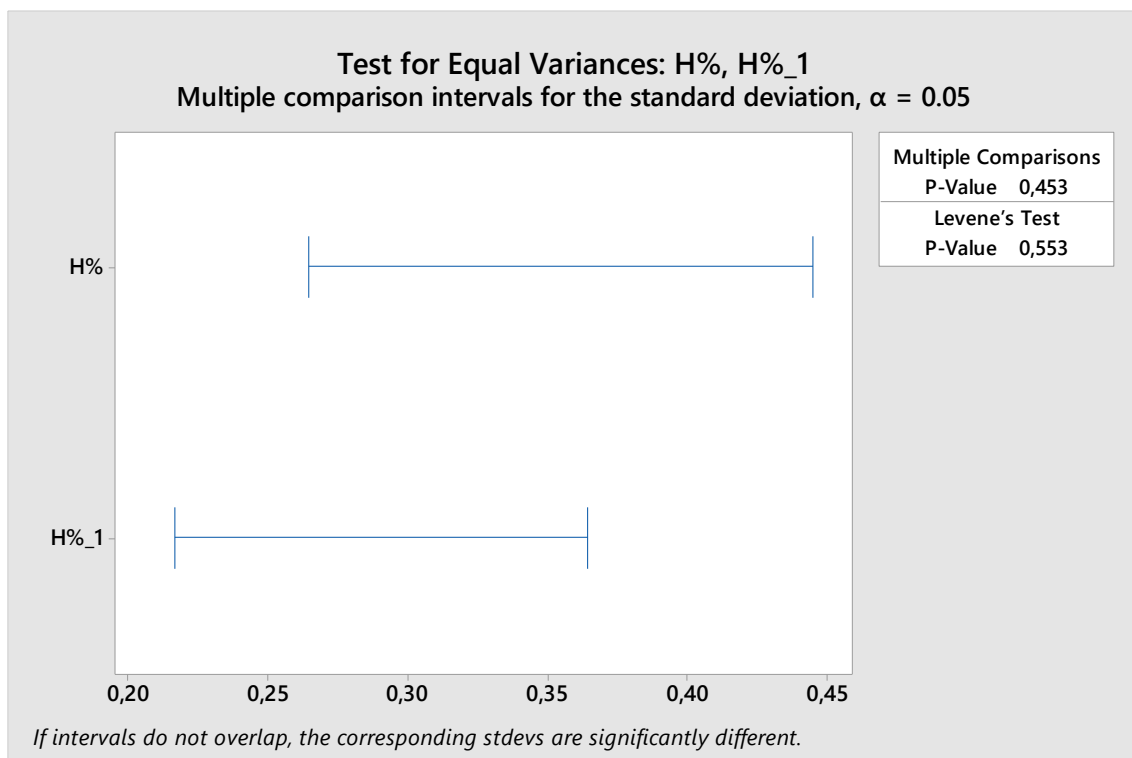
Sample	N	StDev	CI
H%	15	0.319968	(0.216609, 0.555679)
H%_1	15	0.262044	(0.171141, 0.471719)

Individual confidence level = 97.5%

#### Tests

Method	Test Statistic	P-Value
Multiple comparisons	0.56	0.453
Levene	0.36	0.553

#### Test for Equal Variances: H%, H%\_1



# Test for Equal Variances: IRT/Af, IRT/Af\_1

## Method

Null hypothesis            All variances are equal

Alternative hypothesis    At least one variance is different

Significance level         $\alpha = 0.05$

*F method is used. This method is accurate for normal data only.*

## 95% Bonferroni Confidence Intervals for Standard Deviations

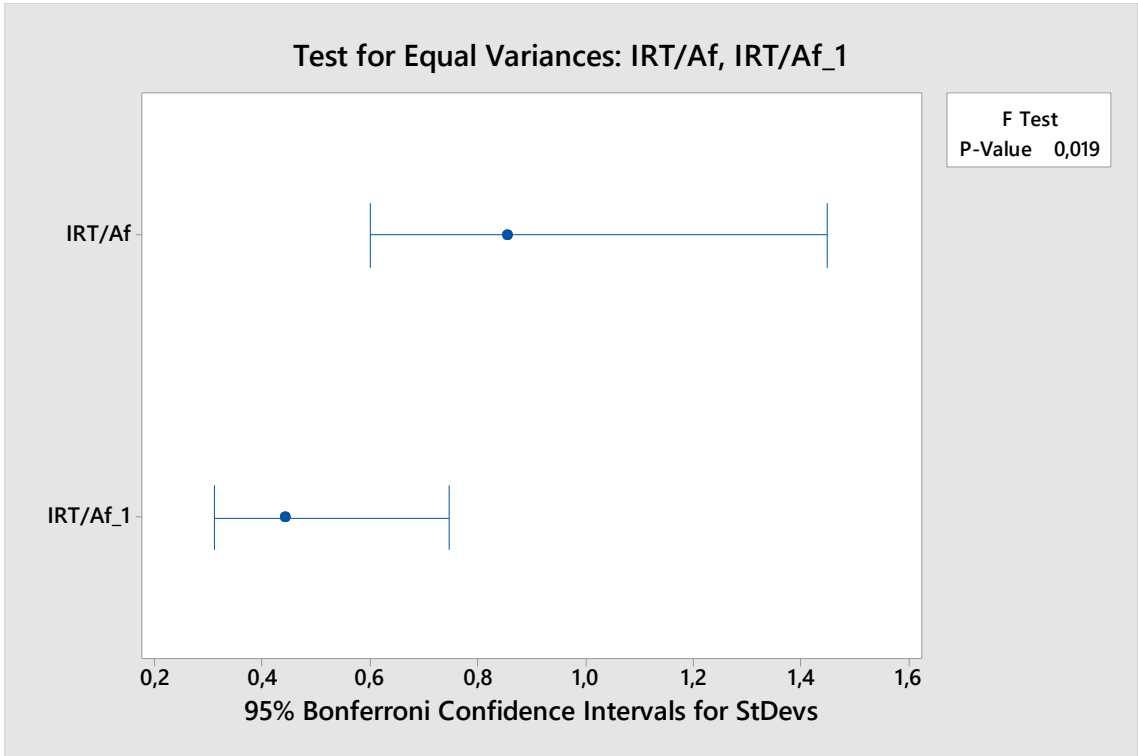
Sample	N	StDev	CI
IRT/Af	15	0.854163	(0.599484, 1.44776)
IRT/Af_1	15	0.441190	(0.309644, 0.74779)

*Individual confidence level = 97.5%*

## Tests

Test		
Method	Statistic	P-Value
F	3.75	0.019

## Test for Equal Variances: IRT/Af, IRT/Af\_1



# Test for Equal Variances: GF, GF\_1

## Method

Null hypothesis            All variances are equal

Alternative hypothesis    At least one variance is different

Significance level         $\alpha = 0.05$

*F method is used. This method is accurate for normal data only.*

## 95% Bonferroni Confidence Intervals for Standard Deviations

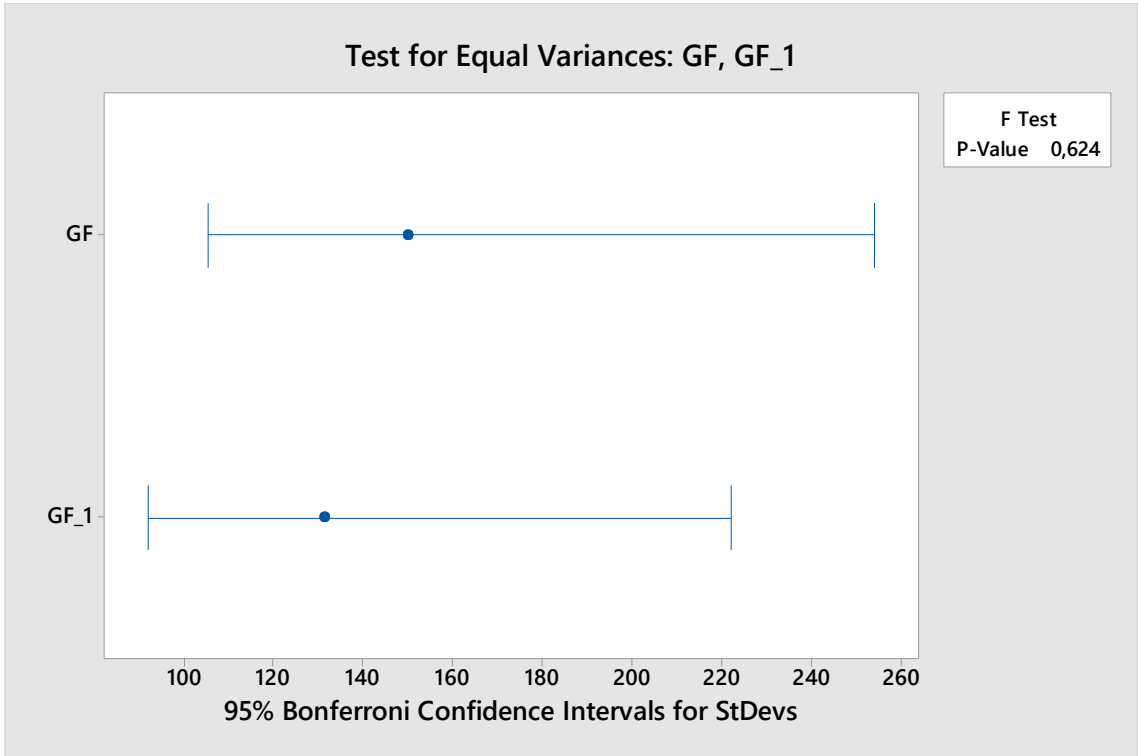
Sample	N	StDev	CI
GF	15	149.919	(105.219, 254.105)
GF_1	15	131.164	(92.056, 222.316)

Individual confidence level = 97.5%

## Tests

Method	Test	
	Statistic	P-Value
F	1.31	0.624

## Test for Equal Variances: GF, GF\_1





# Test for Equal Variances: d0,5Pm, d0,5Pm\_1

## Method

Null hypothesis            All variances are equal

Alternative hypothesis    At least one variance is different

Significance level         $\alpha = 0.05$

*F method is used. This method is accurate for normal data only.*

## 95% Bonferroni Confidence Intervals for Standard Deviations

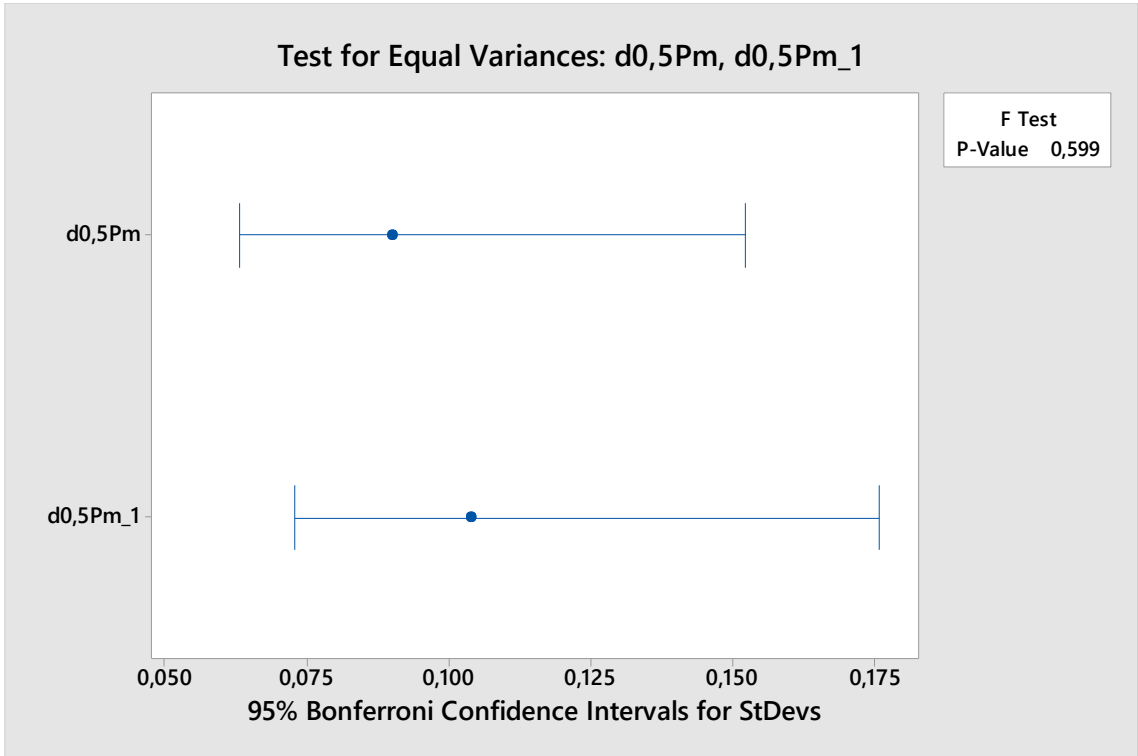
Sample	N	StDev	CI
d0,5Pm	15	0.089884	(0.0630843, 0.152349)
d0,5Pm_1	15	0.103746	(0.0728128, 0.175844)

Individual confidence level = 97.5%

## Tests

Test		
Method	Statistic	P-Value
F	0.75	0.599

## Test for Equal Variances: d0,5Pm, d0,5Pm\_1



## AC-22S 4cm 20°C vs AC-22S 6cm 20°C

### Test for Equal Variances: H%, H%\_1

#### Method

Null hypothesis All variances are equal  
 Alternative hypothesis At least one variance is different  
 Significance level  $\alpha = 0.05$

#### 95% Bonferroni Confidence Intervals for Standard Deviations

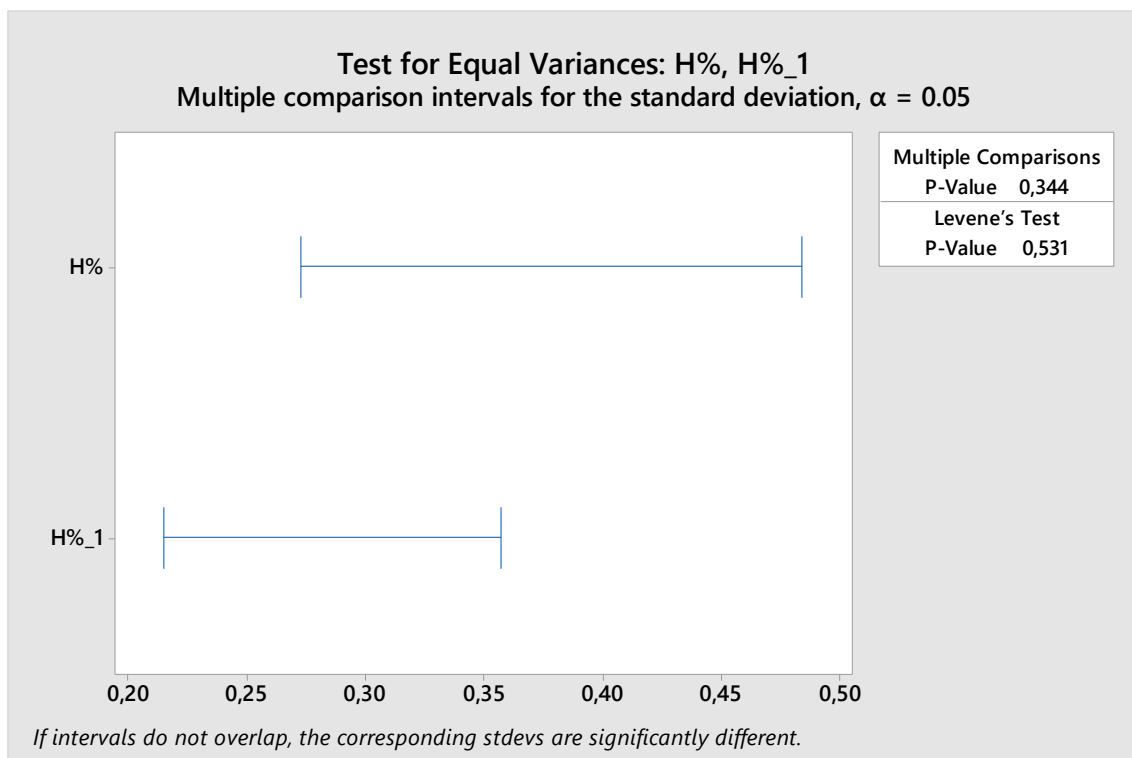
Sample	N	StDev	CI
H%	13	0.334998	(0.219430, 0.617983)
H%_1	16	0.259894	(0.171342, 0.458430)

Individual confidence level = 97.5%

#### Tests

Method	Test Statistic	P-Value
Multiple comparisons	—	0.344
Levene	0.40	0.531

#### Test for Equal Variances: H%, H%\_1



# Test for Equal Variances: IRT/Af, IRT/Af\_1

## Method

Null hypothesis            All variances are equal

Alternative hypothesis    At least one variance is different

Significance level         $\alpha = 0.05$

*F method is used. This method is accurate for normal data only.*

## 95% Bonferroni Confidence Intervals for Standard Deviations

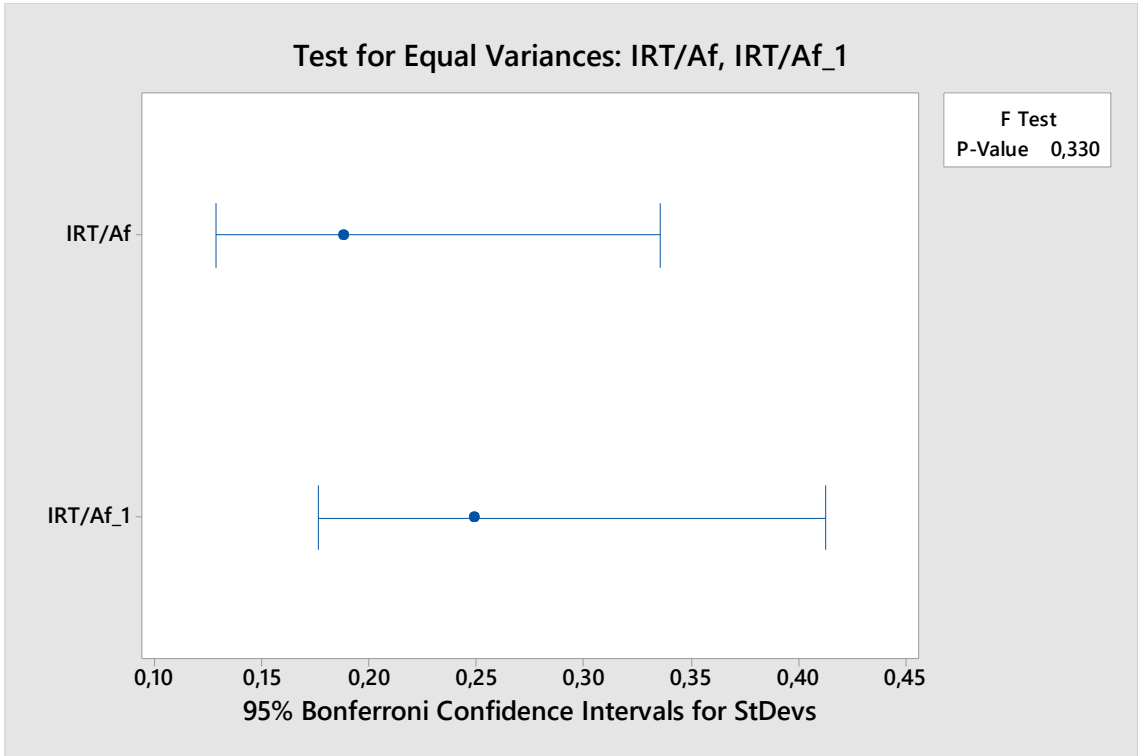
Sample	N	StDev	CI
IRT/Af	13	0.187684	(0.128674, 0.335629)
IRT/Af_1	16	0.248791	(0.176384, 0.412483)

*Individual confidence level = 97.5%*

## Tests

Test		
Method	Statistic	P-Value
F	0.57	0.330

## Test for Equal Variances: IRT/Af, IRT/Af\_1



# Test for Equal Variances: GF, GF\_1

## Method

Null hypothesis            All variances are equal

Alternative hypothesis    At least one variance is different

Significance level         $\alpha = 0.05$

*F method is used. This method is accurate for normal data only.*

## 95% Bonferroni Confidence Intervals for Standard Deviations

Sample	N	StDev	CI
GF	13	31.6531	(21.7009, 56.6041)
GF_1	16	49.5651	(35.1398, 82.1765)

Individual confidence level = 97.5%

## Tests

Test		
Method	Statistic	P-Value
F	0.41	0.124

## Test for Equal Variances: GF, GF\_1



# Test for Equal Variances: d0,5Pm, d0,5Pm\_1

## Method

Null hypothesis            All variances are equal

Alternative hypothesis    At least one variance is different

Significance level         $\alpha = 0.05$

*F method is used. This method is accurate for normal data only.*

## 95% Bonferroni Confidence Intervals for Standard Deviations

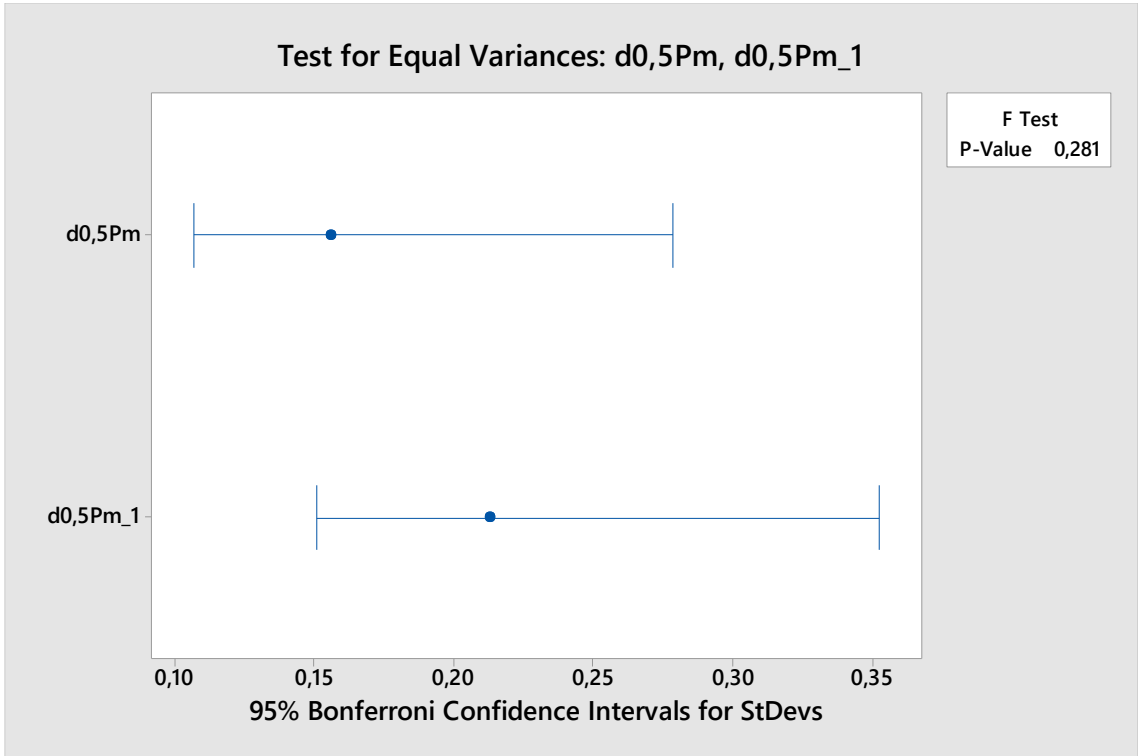
Sample	N	StDev	CI
d0,5Pm	13	0.155651	(0.106712, 0.278345)
d0,5Pm_1	16	0.212677	(0.150780, 0.352608)

*Individual confidence level = 97.5%*

## Tests

Test		
Method	Statistic	P-Value
F	0.54	0.281

## Test for Equal Variances: d0,5Pm, d0,5Pm\_1



- Diferente tamaño máximo de árido:

### AC-16S 4cm 5°C vs AC-22S 4cm 5°C

## Test for Equal Variances: H%, H%\_1

### Method

Null hypothesis All variances are equal  
 Alternative hypothesis At least one variance is different  
 Significance level  $\alpha = 0.05$

### 95% Bonferroni Confidence Intervals for Standard Deviations

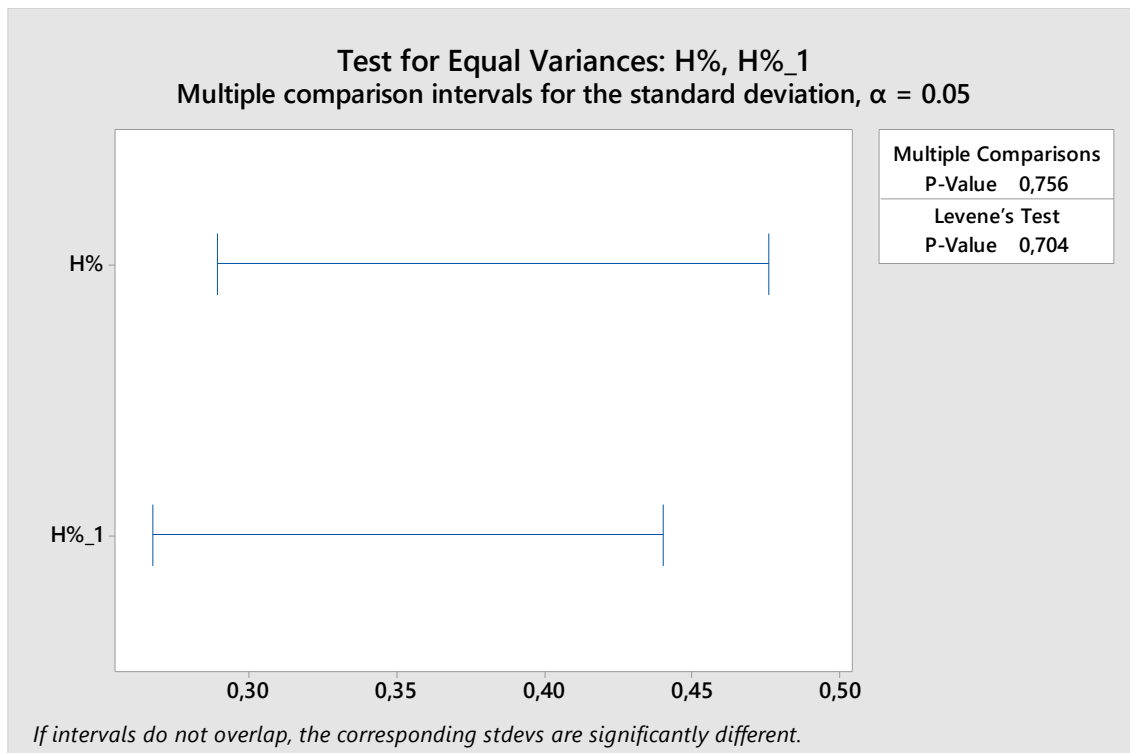
Sample	N	StDev	CI
H%	15	0.346266	(0.234277, 0.601698)
H%_1	15	0.319968	(0.216609, 0.555679)

Individual confidence level = 97.5%

### Tests

Method	Test Statistic	P-Value
Multiple comparisons	0.10	0.756
Levene	0.15	0.704

### Test for Equal Variances: H%, H%\_1



# Test for Equal Variances: IRT/Af, IRT/Af\_1

## Method

Null hypothesis            All variances are equal

Alternative hypothesis    At least one variance is different

Significance level         $\alpha = 0.05$

*F method is used. This method is accurate for normal data only.*

## 95% Bonferroni Confidence Intervals for Standard Deviations

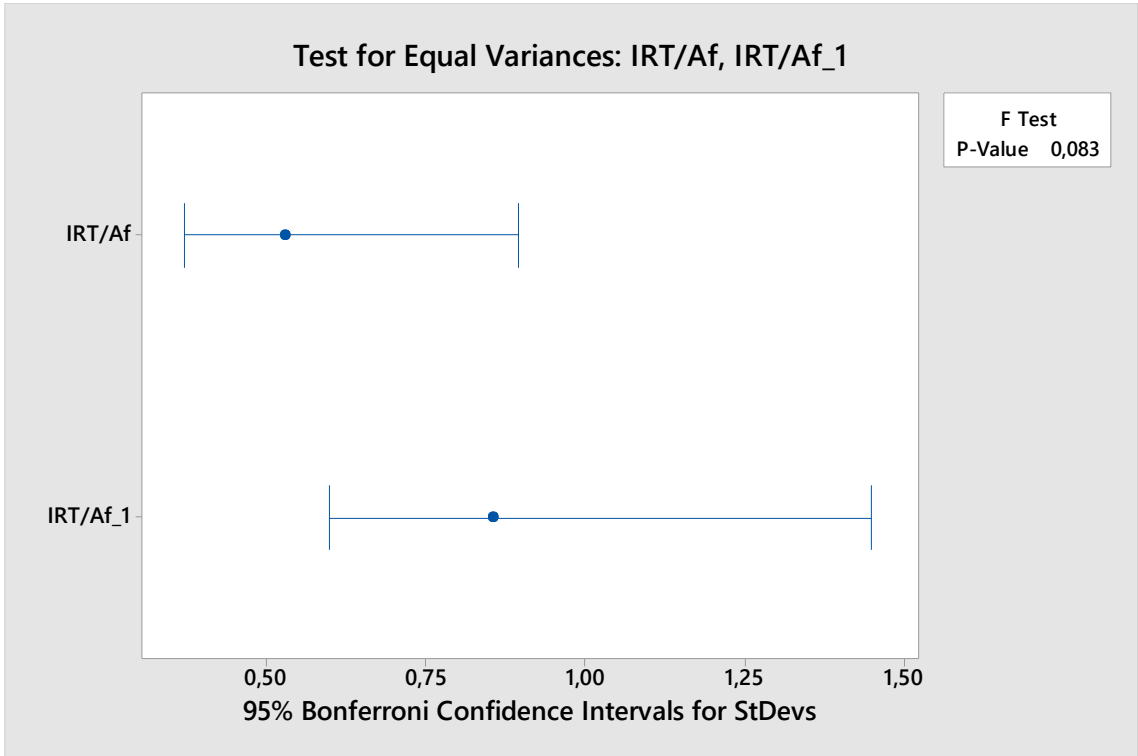
Sample	N	StDev	CI
IRT/Af	15	0.528124	(0.370658, 0.89514)
IRT/Af_1	15	0.854163	(0.599484, 1.44776)

*Individual confidence level = 97.5%*

## Tests

Test		
Method	Statistic	P-Value
F	0.38	0.083

## Test for Equal Variances: IRT/Af, IRT/Af\_1



# Test for Equal Variances: GF, GF\_1

## Method

Null hypothesis            All variances are equal

Alternative hypothesis    At least one variance is different

Significance level         $\alpha = 0.05$

*F method is used. This method is accurate for normal data only.*

## 95% Bonferroni Confidence Intervals for Standard Deviations

Sample	N	StDev	CI
GF	15	76.353	(53.587, 129.414)
GF_1	15	149.919	(105.219, 254.105)

Individual confidence level = 97.5%

## Tests

Method	Test	
	Statistic	P-Value
F	0.26	0.017

## Test for Equal Variances: GF, GF\_1





# Test for Equal Variances: d0,5Pm, d0,5Pm\_1

## Method

Null hypothesis            All variances are equal

Alternative hypothesis    At least one variance is different

Significance level         $\alpha = 0.05$

*F method is used. This method is accurate for normal data only.*

## 95% Bonferroni Confidence Intervals for Standard Deviations

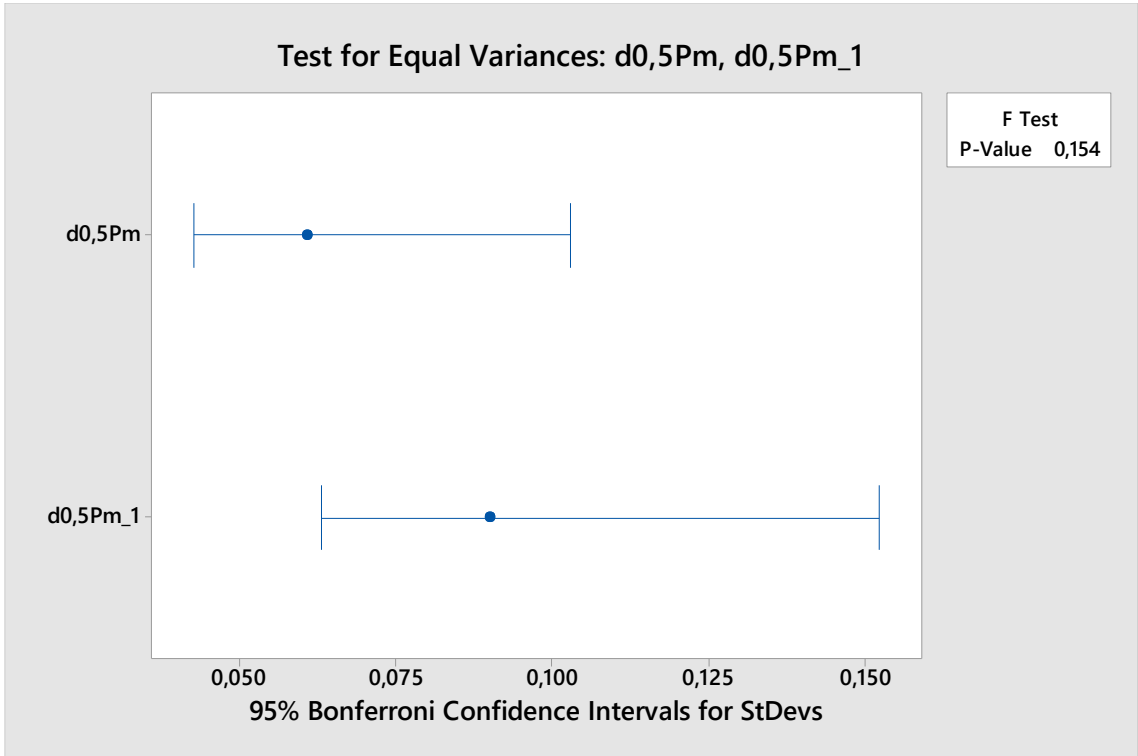
Sample	N	StDev	CI
d0,5Pm	15	0.0607075	(0.0426068, 0.102896)
d0,5Pm_1	15	0.0898843	(0.0630843, 0.152349)

Individual confidence level = 97.5%

## Tests

Test		
Method	Statistic	P-Value
F	0.46	0.154

## Test for Equal Variances: d0,5Pm, d0,5Pm\_1



## AC-16S 4cm 20°C vs AC-22S 4cm 20°C

### Test for Equal Variances: H%, H%\_1

#### Method

Null hypothesis All variances are equal  
Alternative hypothesis At least one variance is different  
Significance level  $\alpha = 0.05$

#### 95% Bonferroni Confidence Intervals for Standard Deviations

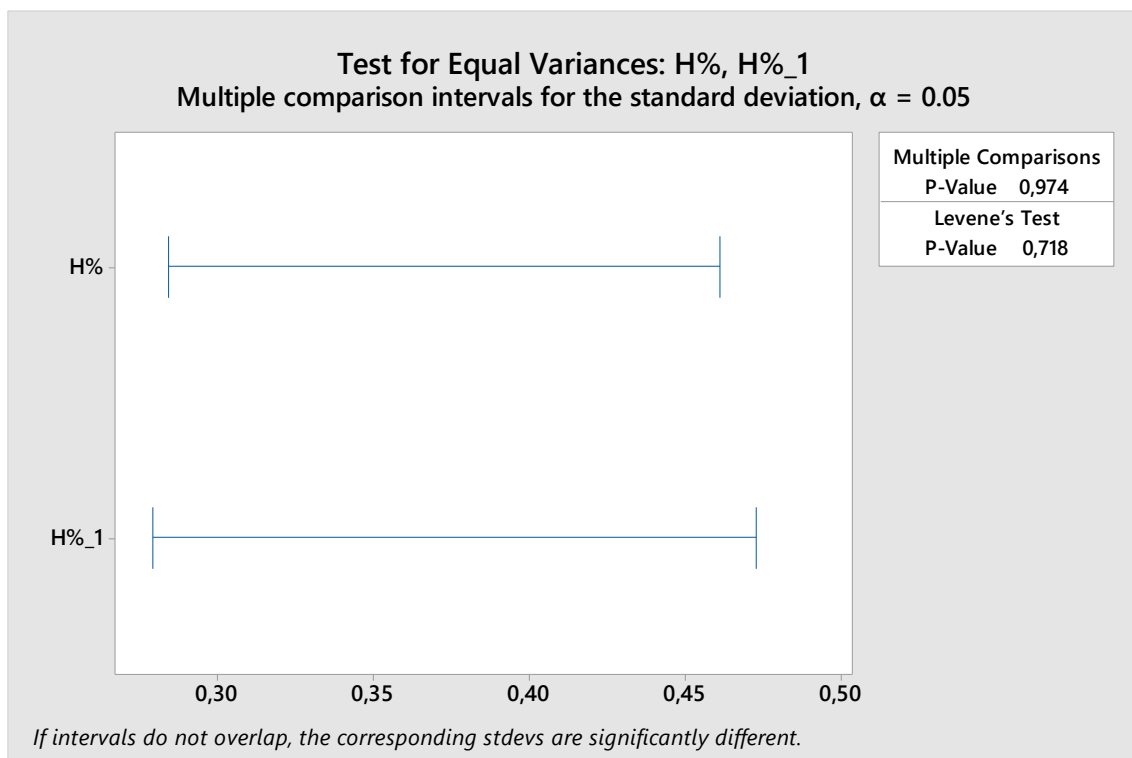
Sample	N	StDev	CI
H%	15	0.337885	(0.231677, 0.579351)
H%_1	13	0.334998	(0.219430, 0.617983)

Individual confidence level = 97.5%

#### Tests

Method	Test	
	Statistic	P-Value
Multiple comparisons	—	0.974
Levene	0.13	0.718

#### Test for Equal Variances: H%, H%\_1



# Test for Equal Variances: IRT/Af, IRT/Af\_1

## Method

Null hypothesis            All variances are equal

Alternative hypothesis    At least one variance is different

Significance level         $\alpha = 0.05$

*F method is used. This method is accurate for normal data only.*

## 95% Bonferroni Confidence Intervals for Standard Deviations

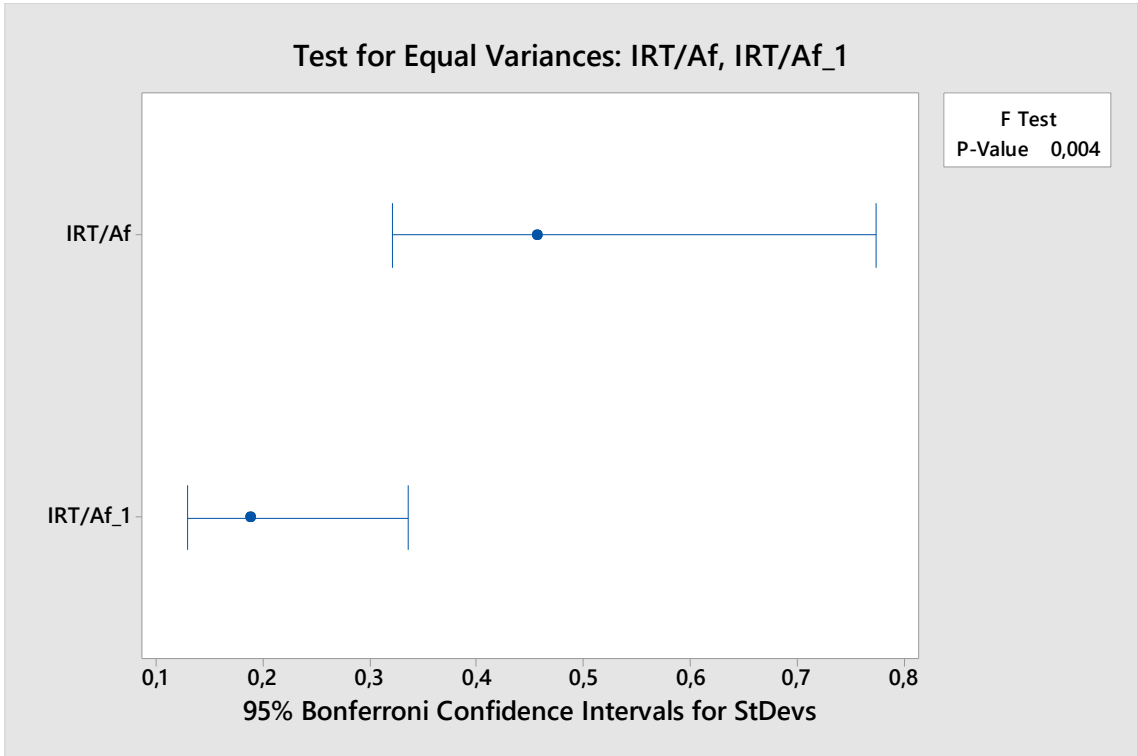
Sample	N	StDev	CI
IRT/Af	15	0.456376	(0.320302, 0.773533)
IRT/Af_1	13	0.187684	(0.128674, 0.335629)

*Individual confidence level = 97.5%*

## Tests

Test		
Method	Statistic	P-Value
F	5.91	0.004

## Test for Equal Variances: IRT/Af, IRT/Af\_1



# Test for Equal Variances: GF, GF\_1

## Method

Null hypothesis            All variances are equal

Alternative hypothesis    At least one variance is different

Significance level         $\alpha = 0.05$

*F method is used. This method is accurate for normal data only.*

## 95% Bonferroni Confidence Intervals for Standard Deviations

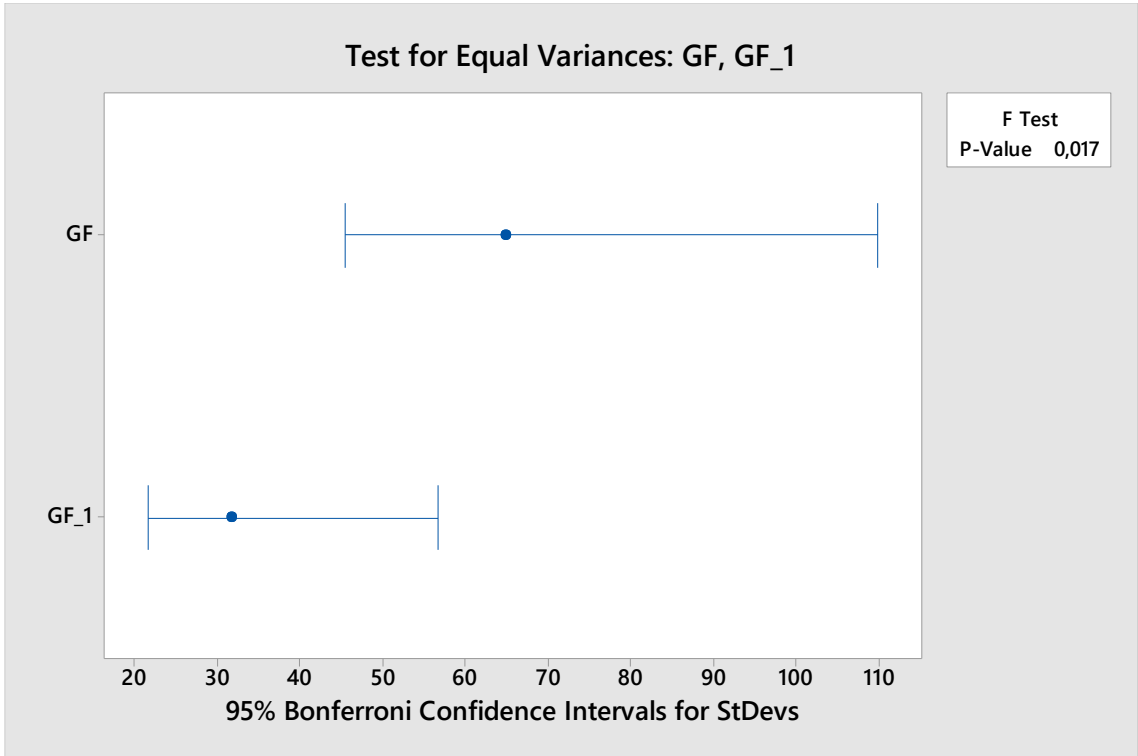
Sample	N	StDev	CI
GF	15	64.7756	(45.4620, 109.791)
GF_1	13	31.6531	(21.7009, 56.604)

Individual confidence level = 97.5%

## Tests

Test		
Method	Statistic	P-Value
F	4.19	0.017

## Test for Equal Variances: GF, GF\_1



# Test for Equal Variances: d0,5Pm, d0,5Pm\_1

## Method

Null hypothesis            All variances are equal

Alternative hypothesis    At least one variance is different

Significance level         $\alpha = 0.05$

*F method is used. This method is accurate for normal data only.*

## 95% Bonferroni Confidence Intervals for Standard Deviations

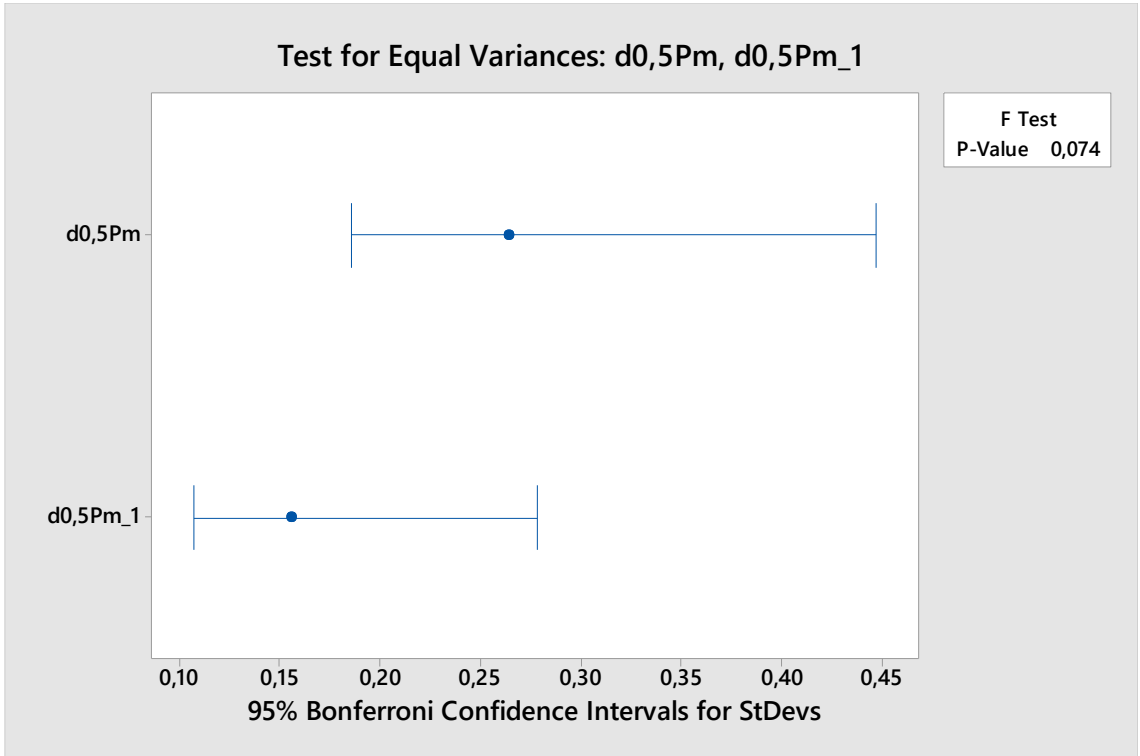
Sample	N	StDev	CI
d0,5Pm	15	0.263961	(0.185258, 0.447400)
d0,5Pm_1	13	0.155651	(0.106712, 0.278345)

Individual confidence level = 97.5%

## Tests

Test		
Method	Statistic	P-Value
F	2.88	0.074

## Test for Equal Variances: d0,5Pm, d0,5Pm\_1



AC-16S 6cm 5°C vs AC-22S 6cm 5°C

Test for Equal Variances: H%, H%\_1  
Method

Null hypothesis            All variances are equal  
Alternative hypothesis    At least one variance is different  
Significance level         $\alpha = 0.05$   
*F method is used. This method is accurate for normal data only.*

95% Bonferroni Confidence Intervals for Standard Deviations

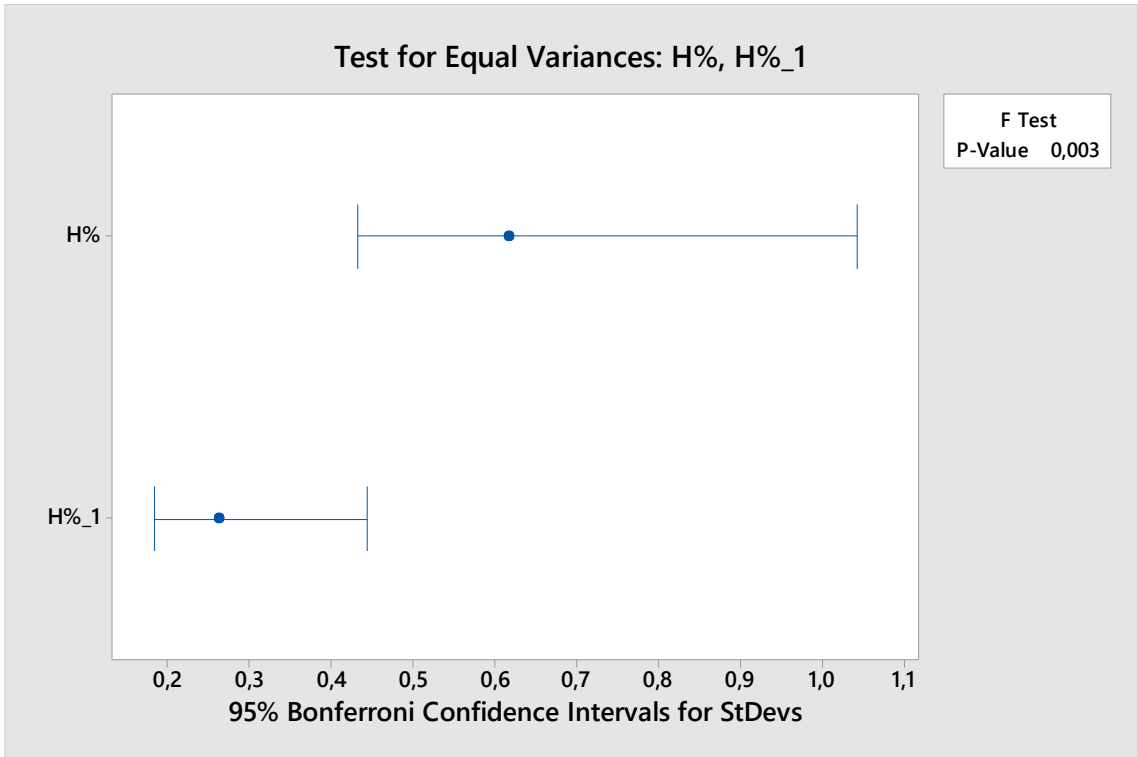
Sample	N	StDev	CI
H%	15	0.615804	(0.432195, 1.04376)
H%_1	15	0.262044	(0.183913, 0.44415)

Individual confidence level = 97.5%

Tests

Method	Test	
	Statistic	P-Value
F	5.52	0.003

Test for Equal Variances: H%, H%\_1



# Test for Equal Variances: IRT/Af, IRT/Af\_1

## Method

Null hypothesis            All variances are equal

Alternative hypothesis    At least one variance is different

Significance level         $\alpha = 0.05$

*F method is used. This method is accurate for normal data only.*

## 95% Bonferroni Confidence Intervals for Standard Deviations

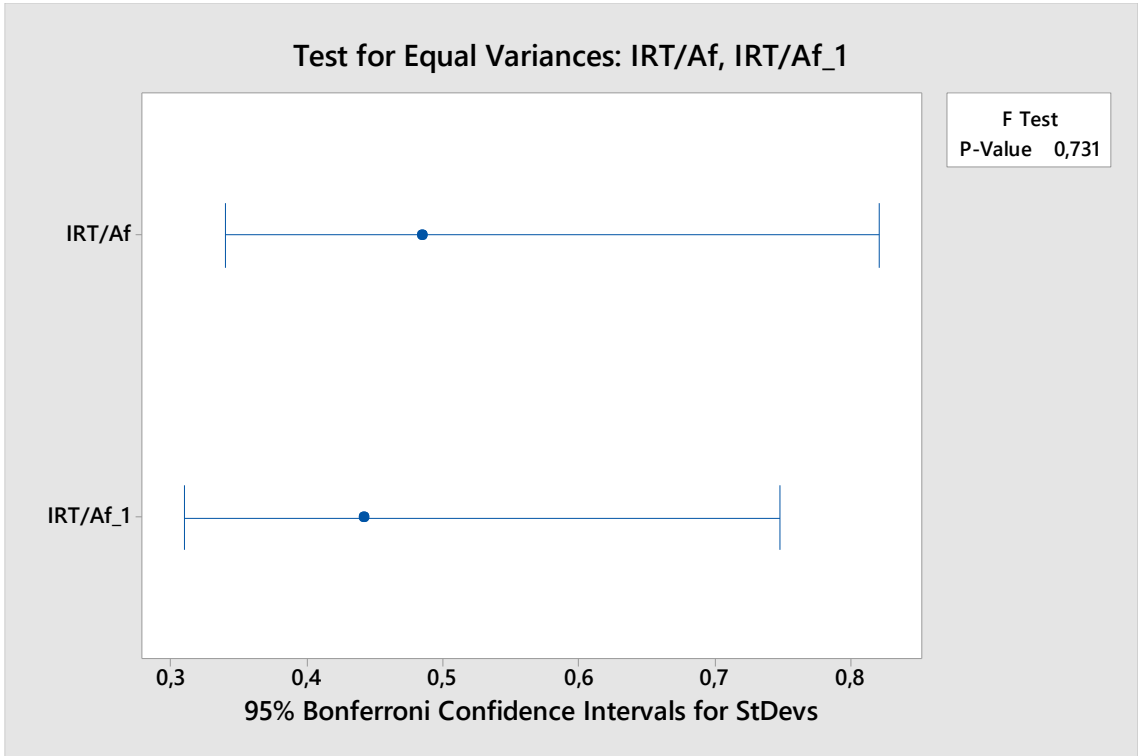
Sample	N	StDev	CI
IRT/Af	15	0.484505	(0.340044, 0.821210)
IRT/Af_1	15	0.441190	(0.309644, 0.747794)

*Individual confidence level = 97.5%*

## Tests

Test		
Method	Statistic	P-Value
F	1.21	0.731

## Test for Equal Variances: IRT/Af, IRT/Af\_1



# Test for Equal Variances: GF, GF\_1

## Method

Null hypothesis            All variances are equal

Alternative hypothesis    At least one variance is different

Significance level         $\alpha = 0.05$

*F method is used. This method is accurate for normal data only.*

## 95% Bonferroni Confidence Intervals for Standard Deviations

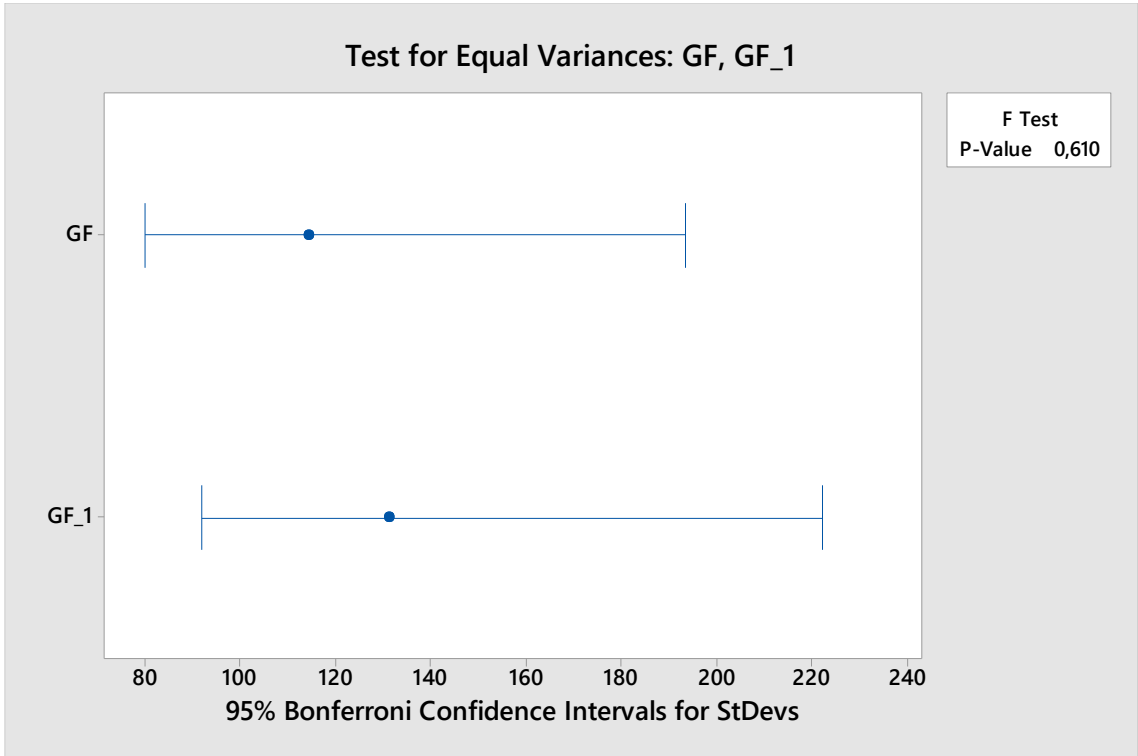
Sample	N	StDev	CI
GF	15	114.142	(80.1093, 193.465)
GF_1	15	131.164	(92.0558, 222.316)

Individual confidence level = 97.5%

## Tests

Test		
Method	Statistic	P-Value
F	0.76	0.610

## Test for Equal Variances: GF, GF\_1





# Test for Equal Variances: d0,5Pm, d0,5Pm\_1

## Method

Null hypothesis            All variances are equal

Alternative hypothesis    At least one variance is different

Significance level         $\alpha = 0.05$

*F method is used. This method is accurate for normal data only.*

## 95% Bonferroni Confidence Intervals for Standard Deviations

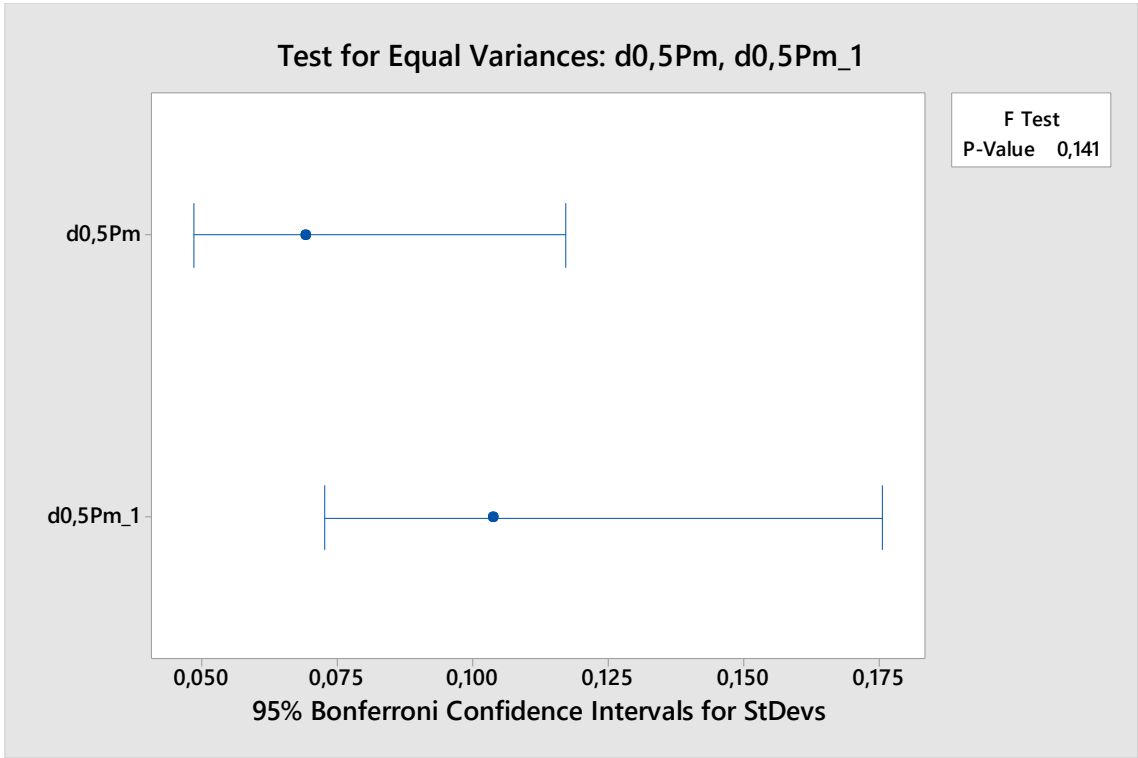
Sample	N	StDev	CI
d0,5Pm	15	0.069161	(0.0485399, 0.117224)
d0,5Pm_1	15	0.103746	(0.0728128, 0.175844)

Individual confidence level = 97.5%

## Tests

Test		
Method	Statistic	P-Value
F	0.44	0.141

## Test for Equal Variances: d0,5Pm, d0,5Pm\_1



AC-16S 6cm 20°C vs AC-22S 6cm 20°C

Test for Equal Variances: H%, H%\_1

Method

Null hypothesis All variances are equal  
Alternative hypothesis At least one variance is different  
Significance level  $\alpha = 0.05$   
*F method is used. This method is accurate for normal data only.*

95% Bonferroni Confidence Intervals for Standard Deviations

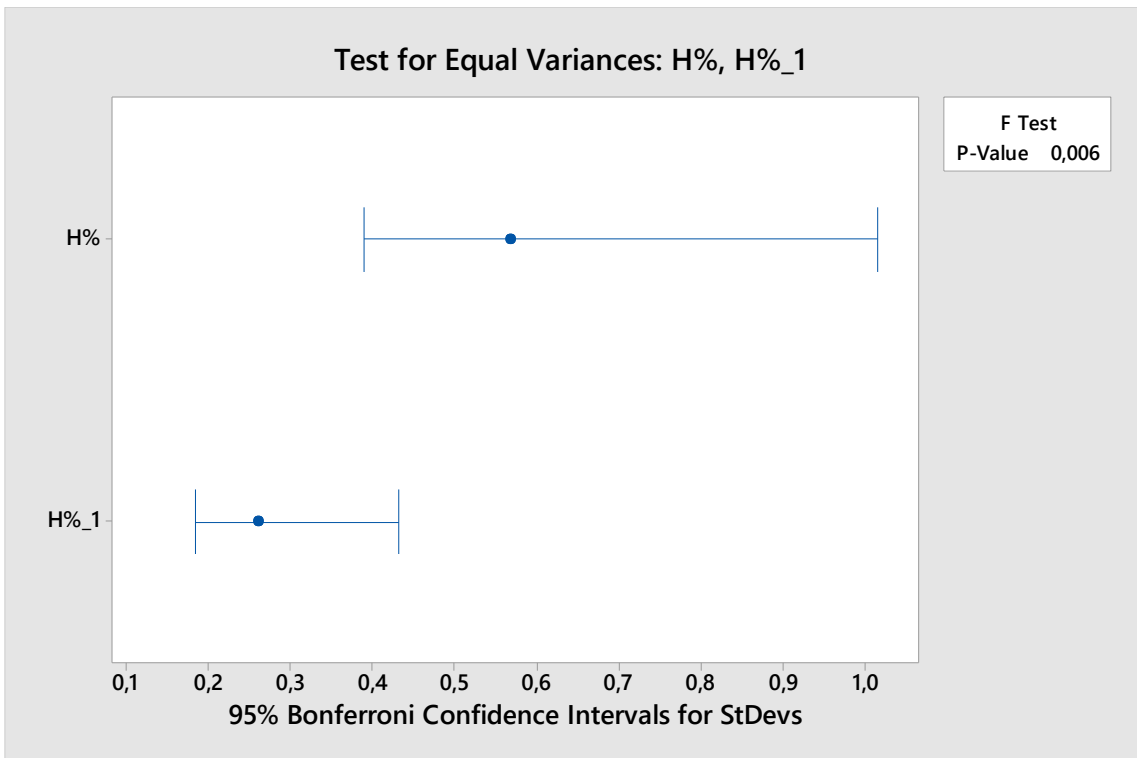
Sample	N	StDev	CI
H%	13	0.567126	(0.388813, 1.01417)
H%_1	16	0.259894	(0.184255, 0.43089)

Individual confidence level = 97.5%

Tests

Method	Test	
	Statistic	P-Value
F	4.76	0.006

Test for Equal Variances: H%, H%\_1



# Test for Equal Variances: IRT/Af, IRT/Af\_1

## Method

Null hypothesis            All variances are equal

Alternative hypothesis    At least one variance is different

Significance level         $\alpha = 0.05$

*F method is used. This method is accurate for normal data only.*

## 95% Bonferroni Confidence Intervals for Standard Deviations

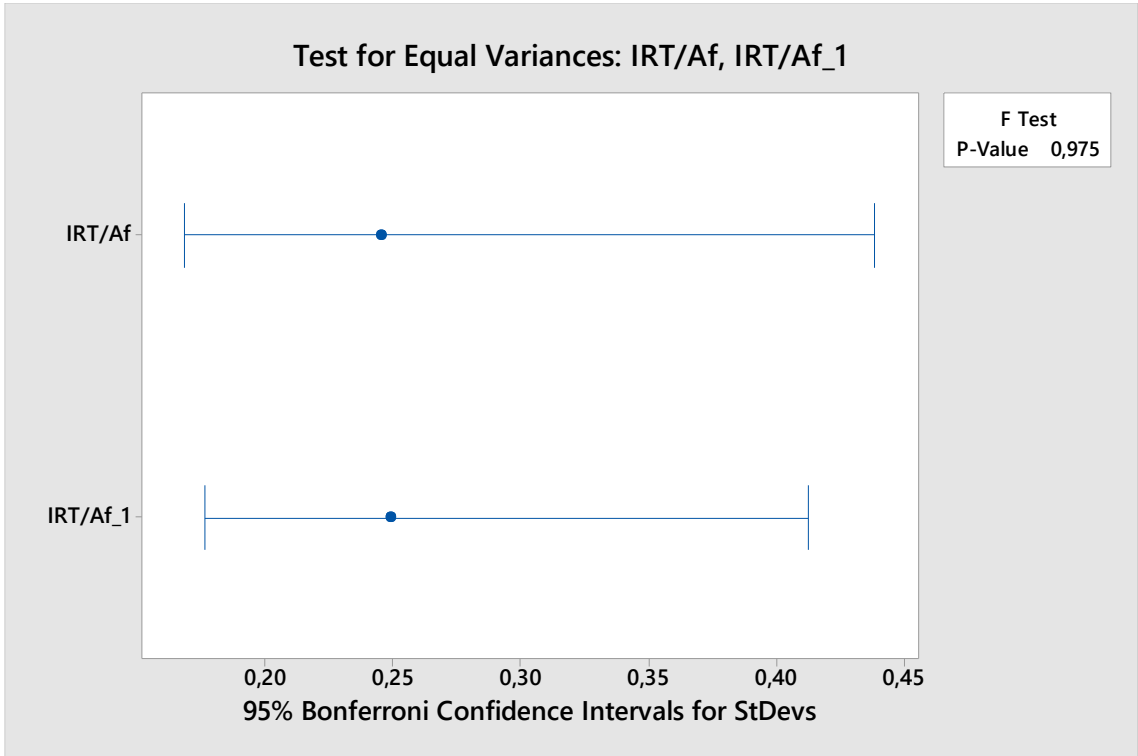
Sample	N	StDev	CI
IRT/Af	13	0.245183	(0.168094, 0.438453)
IRT/Af_1	16	0.248791	(0.176384, 0.412483)

Individual confidence level = 97.5%

## Tests

Test		
Method	Statistic	P-Value
F	0.97	0.975

## Test for Equal Variances: IRT/Af, IRT/Af\_1



# Test for Equal Variances: GF, GF\_1

## Method

Null hypothesis            All variances are equal

Alternative hypothesis    At least one variance is different

Significance level         $\alpha = 0.05$

*F method is used. This method is accurate for normal data only.*

## 95% Bonferroni Confidence Intervals for Standard Deviations

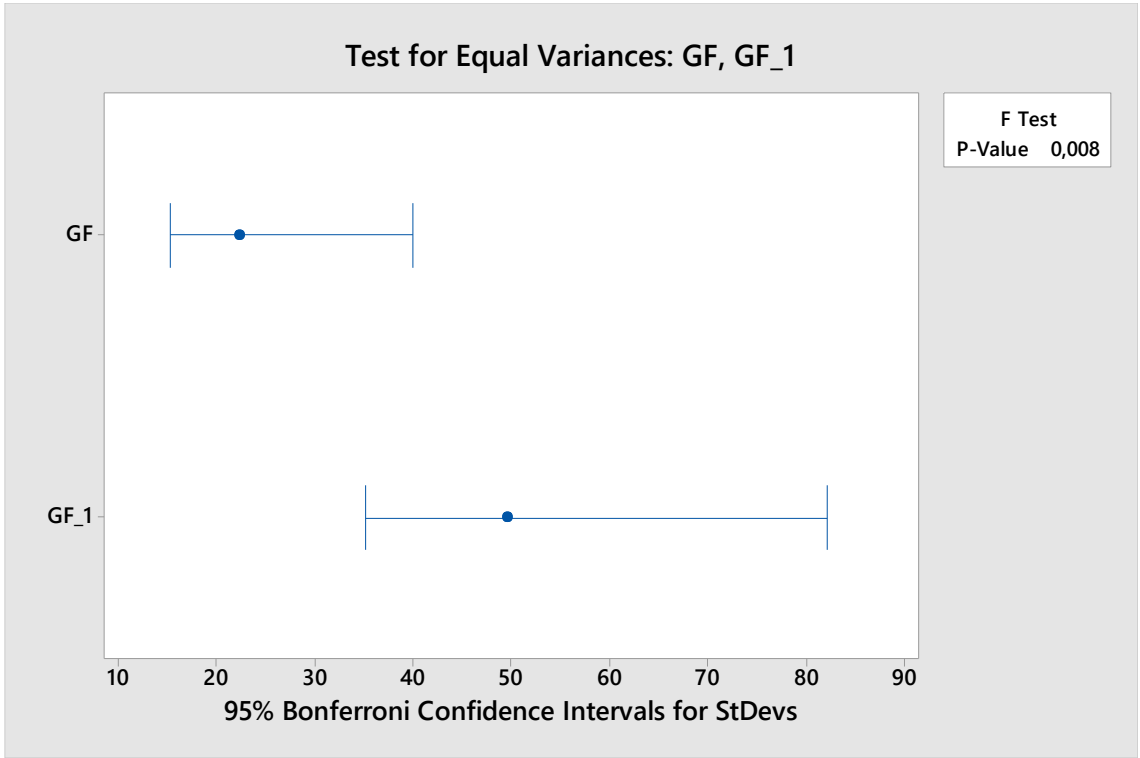
Sample	N	StDev	CI
GF	13	22.3589	(15.3289, 39.9835)
GF_1	16	49.5651	(35.1398, 82.1765)

Individual confidence level = 97.5%

## Tests

Method	Test	
	Statistic	P-Value
F	0.20	0.008

## Test for Equal Variances: GF, GF\_1



# Test for Equal Variances: d0,5Pm, d0,5Pm\_1

## Method

Null hypothesis            All variances are equal

Alternative hypothesis    At least one variance is different

Significance level         $\alpha = 0.05$

*F method is used. This method is accurate for normal data only.*

## 95% Bonferroni Confidence Intervals for Standard Deviations

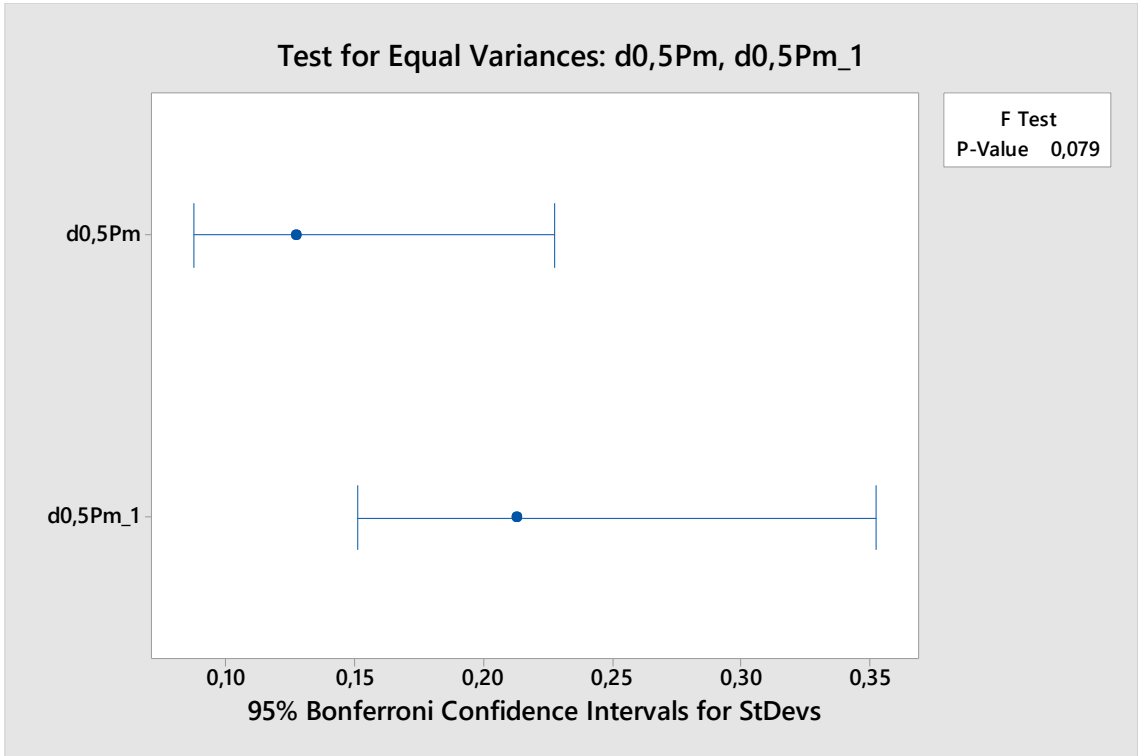
Sample	N	StDev	CI
d0,5Pm	13	0.127102	(0.087140, 0.227293)
d0,5Pm_1	16	0.212677	(0.150780, 0.352608)

Individual confidence level = 97.5%

## Tests

Test		
Method	Statistic	P-Value
F	0.36	0.079

## Test for Equal Variances: d0,5Pm, d0,5Pm\_1



## ANEJO 5

### Test de T-Student

- Diferente altura de probeta:

AC16 800 5°C vs AC16 1100 5°C

## Two-Sample T-Test and CI: H%, H%\_1 Method

$\mu_1$ : mean of H%

$\mu_2$ : mean of H%\_1

Difference:  $\mu_1 - \mu_2$

*Equal variances are not assumed for this analysis.*

### Descriptive Statistics

Sample	N	Mean	StDev	SE Mean
H%	15	3.445	0.346	0.089
H%_1	15	4.381	0.616	0.16

### Estimation for Difference

Difference	95% CI for Difference
-0.936	(-1.314, -0.558)

### Test

Null hypothesis  $H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$

Alternative hypothesis  $H_1: \mu_1 - \mu_2 \neq 0$

T-Value	DF	P-Value
-5.13	22	0.000

## Two-Sample T-Test and CI: IRT/Af, IRT/Af\_1

### Method

$\mu_1$ : mean of IRT/Af

$\mu_2$ : mean of IRT/Af\_1

Difference:  $\mu_1 - \mu_2$

*Equal variances are assumed for this analysis.*

### Descriptive Statistics

Sample	N	Mean	StDev	SE Mean
IRT/Af	15	5.817	0.528	0.14
IRT/Af_1	15	4.911	0.485	0.13

### Estimation for Difference

Difference	Pooled StDev	95% CI for Difference
0.906	0.507	(0.527, 1.285)

### Test

Null hypothesis  $H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$

Alternative hypothesis  $H_1: \mu_1 - \mu_2 \neq 0$

T-Value	DF	P-Value
4.90	28	0.000

## Two-Sample T-Test and CI: GF, GF\_1

### Method

$\mu_1$ : mean of GF

$\mu_2$ : mean of GF\_1

Difference:  $\mu_1 - \mu_2$

*Equal variances are assumed for this analysis.*

### Descriptive Statistics

Sample	N	Mean	StDev	SE Mean
GF	15	799.5	76.4	20
GF_1	15	757	114	29

### Estimation for Difference

Difference	Pooled StDev	95% CI for Difference
42.7	97.1	(-30.0, 115.3)

### Test

Null hypothesis  $H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$

Alternative hypothesis  $H_1: \mu_1 - \mu_2 \neq 0$

T-Value	DF	P-Value
1.20	28	0.239



## Two-Sample T-Test and CI: d0,5Pm, d0,5Pm\_1

### Method

$\mu_1$ : mean of d0,5Pm

$\mu_2$ : mean of d0,5Pm\_1

Difference:  $\mu_1 - \mu_2$

*Equal variances are assumed for this analysis.*

### Descriptive Statistics

Sample	N	Mean	StDev	SE Mean
d0,5Pm	15	0.6297	0.0607	0.016
d0,5Pm_1	15	0.5964	0.0692	0.018

### Estimation for Difference

Difference	Pooled StDev	95% CI for Difference
0.0334	0.0651	(-0.0153, 0.0821)

### Test

Null hypothesis  $H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$

Alternative hypothesis  $H_1: \mu_1 - \mu_2 \neq 0$

T-Value	DF	P-Value
1.41	28	0.171

## AC16 800 20°C vs AC16 1100 20°C

### Two-Sample T-Test and CI: H%, H%\_1 Method

$\mu_1$ : mean of H%

$\mu_2$ : mean of H%\_1

Difference:  $\mu_1 - \mu_2$

*Equal variances are assumed for this analysis.*

### Descriptive Statistics

Sample	N	Mean	StDev	SE Mean
H%	15	3.468	0.338	0.087
H%_1	13	4.495	0.567	0.16

### Estimation for Difference

Difference	Pooled StDev	95% CI for Difference
-1.027	0.458	(-1.383, -0.670)

### Test

Null hypothesis  $H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$

Alternative hypothesis  $H_1: \mu_1 - \mu_2 \neq 0$

T-Value	DF	P-Value
-5.91	26	0.000

## Two-Sample T-Test and CI: IRT/Af, IRT/Af\_1

### Method

$\mu_1$ : mean of IRT/Af

$\mu_2$ : mean of IRT/Af\_1

Difference:  $\mu_1 - \mu_2$

*Equal variances are not assumed for this analysis.*

### Descriptive Statistics

Sample	N	Mean	StDev	SE Mean
IRT/Af	15	1.493	0.456	0.12
IRT/Af_1	13	1.357	0.245	0.068

### Estimation for Difference

Difference	95% CI for Difference
0.136	(-0.146, 0.419)

### Test

Null hypothesis  $H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$

Alternative hypothesis  $H_1: \mu_1 - \mu_2 \neq 0$

T-Value	DF	P-Value
1.00	22	0.327

## Two-Sample T-Test and CI: GF, GF\_1

### Method

$\mu_1$ : mean of GF

$\mu_2$ : mean of GF\_1

Difference:  $\mu_1 - \mu_2$

*Equal variances are not assumed for this analysis.*

### Descriptive Statistics

Sample	N	Mean	StDev	SE Mean
GF	15	333.0	64.8	17
GF_1	13	348.5	22.4	6.2

### Estimation for Difference

	95% CI for
Difference	Difference
-15.6	(-53.2, 22.1)

### Test

Null hypothesis  $H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$

Alternative hypothesis  $H_1: \mu_1 - \mu_2 \neq 0$

T-Value	DF	P-Value
-0.87	17	0.395

## Two-Sample T-Test and CI: d0,5Pm, d0,5Pm\_1

### Method

$\mu_1$ : mean of d0,5Pm

$\mu_2$ : mean of d0,5Pm\_1

Difference:  $\mu_1 - \mu_2$

*Equal variances are not assumed for this analysis.*

### Descriptive Statistics

Sample	N	Mean	StDev	SE Mean
d0,5Pm	15	1.509	0.264	0.068
d0,5Pm_1	13	1.357	0.127	0.035

### Estimation for Difference

Difference	95% CI for Difference
0.1520	(-0.0080, 0.3121)

### Test

Null hypothesis  $H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$

Alternative hypothesis  $H_1: \mu_1 - \mu_2 \neq 0$

T-Value	DF	P-Value
1.98	20	0.061

## AC22 800 5°C vs AC22 1100 5°C

### Two-Sample T-Test and CI: H%, H%\_1 Method

$\mu_1$ : mean of H%

$\mu_2$ : mean of H%\_1

Difference:  $\mu_1 - \mu_2$

*Equal variances are assumed for this analysis.*

### Descriptive Statistics

Sample	N	Mean	StDev	SE Mean
H%	15	3.337	0.320	0.083
H%_1	15	3.441	0.262	0.068

### Estimation for Difference

Difference	Pooled StDev	95% CI for Difference
-0.105	0.292	(-0.323, 0.114)

### Test

Null hypothesis  $H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$

Alternative hypothesis  $H_1: \mu_1 - \mu_2 \neq 0$

T-Value	DF	P-Value
-0.98	28	0.336

## Two-Sample T-Test and CI: IRT/Af, IRT/Af\_1

### Method

$\mu_1$ : mean of IRT/Af

$\mu_2$ : mean of IRT/Af\_1

Difference:  $\mu_1 - \mu_2$

*Equal variances are not assumed for this analysis.*

### Descriptive Statistics

Sample	N	Mean	StDev	SE Mean
IRT/Af	15	5.864	0.854	0.22
IRT/Af_1	15	5.008	0.441	0.11

### Estimation for Difference

Difference	95% CI for Difference
0.856	(0.338, 1.374)

### Test

Null hypothesis  $H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$

Alternative hypothesis  $H_1: \mu_1 - \mu_2 \neq 0$

T-Value	DF	P-Value
3.45	20	0.003

## Two-Sample T-Test and CI: GF, GF\_1

### Method

$\mu_1$ : mean of GF

$\mu_2$ : mean of GF\_1

Difference:  $\mu_1 - \mu_2$

*Equal variances are assumed for this analysis.*

### Descriptive Statistics

Sample	N	Mean	StDev	SE Mean
GF	15	752	150	39
GF_1	15	779	131	34

### Estimation for Difference

Difference	Pooled StDev	95% CI for Difference
-26.6	140.9	(-131.9, 78.8)

### Test

Null hypothesis  $H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$

Alternative hypothesis  $H_1: \mu_1 - \mu_2 \neq 0$

T-Value	DF	P-Value
-0.52	28	0.610



## Two-Sample T-Test and CI: d0,5Pm, d0,5Pm\_1

### Method

$\mu_1$ : mean of d0,5Pm

$\mu_2$ : mean of d0,5Pm\_1

Difference:  $\mu_1 - \mu_2$

*Equal variances are assumed for this analysis.*

### Descriptive Statistics

Sample	N	Mean	StDev	SE Mean
d0,5Pm	15	0.5488	0.0899	0.023
d0,5Pm_1	15	0.587	0.104	0.027

### Estimation for Difference

Difference	Pooled StDev	95% CI for Difference
-0.0386	0.0971	(-0.1112, 0.0340)

### Test

Null hypothesis  $H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$

Alternative hypothesis  $H_1: \mu_1 - \mu_2 \neq 0$

T-Value	DF	P-Value
-1.09	28	0.285

## AC22 800 20°C vs AC22 1100 20°C

### Two-Sample T-Test and CI: H%, H%\_1 Method

$\mu_1$ : mean of H%

$\mu_2$ : mean of H%\_1

Difference:  $\mu_1 - \mu_2$

*Equal variances are assumed for this analysis.*

### Descriptive Statistics

Sample	N	Mean	StDev	SE Mean
H%	13	3.327	0.335	0.093
H%_1	16	3.456	0.260	0.065

### Estimation for Difference

Difference	Pooled StDev	95% CI for Difference
-0.129	0.296	(-0.356, 0.097)

### Test

Null hypothesis  $H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$

Alternative hypothesis  $H_1: \mu_1 - \mu_2 \neq 0$

T-Value	DF	P-Value
-1.17	27	0.252

## Two-Sample T-Test and CI: IRT/Af, IRT/Af\_1

### Method

$\mu_1$ : mean of IRT/Af

$\mu_2$ : mean of IRT/Af\_1

Difference:  $\mu_1 - \mu_2$

*Equal variances are assumed for this analysis.*

### Descriptive Statistics

Sample	N	Mean	StDev	SE Mean
IRT/Af	13	1.880	0.188	0.052
IRT/Af_1	16	1.658	0.249	0.062

### Estimation for Difference

Difference	Pooled StDev	95% CI for Difference
0.2215	0.2237	(0.0501, 0.3929)

### Test

Null hypothesis  $H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$

Alternative hypothesis  $H_1: \mu_1 - \mu_2 \neq 0$

T-Value	DF	P-Value
2.65	27	0.013

## Two-Sample T-Test and CI: GF, GF\_1

### Method

$\mu_1$ : mean of GF

$\mu_2$ : mean of GF\_1

Difference:  $\mu_1 - \mu_2$

*Equal variances are assumed for this analysis.*

### Descriptive Statistics

Sample	N	Mean	StDev	SE Mean
GF	13	309.0	31.7	8.8
GF_1	16	356.1	49.6	12

### Estimation for Difference

Difference	Pooled StDev	95% CI for Difference
-47.1	42.5	(-79.7, -14.5)

### Test

Null hypothesis  $H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$

Alternative hypothesis  $H_1: \mu_1 - \mu_2 \neq 0$

T-Value	DF	P-Value
-2.96	27	0.006

## Two-Sample T-Test and CI: d0,5Pm, d0,5Pm\_1

### Method

$\mu_1$ : mean of d0,5Pm

$\mu_2$ : mean of d0,5Pm\_1

Difference:  $\mu_1 - \mu_2$

*Equal variances are assumed for this analysis.*

### Descriptive Statistics

Sample	N	Mean	StDev	SE Mean
d0,5Pm	13	1.306	0.156	0.043
d0,5Pm_1	16	1.342	0.213	0.053

### Estimation for Difference

Difference	Pooled StDev	95% CI for Difference
-0.0367	0.1895	(-0.1818, 0.1085)

### Test

Null hypothesis  $H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$

Alternative hypothesis  $H_1: \mu_1 - \mu_2 \neq 0$

T-Value	DF	P-Value
-0.52	27	0.609

- Diferente tamaño máximo de árido:

AC16 800 5°C vs AC22 800 5°C

## Two-Sample T-Test and CI: H%, H%\_1

### Method

$\mu_1$ : mean of H%

$\mu_2$ : mean of H%\_1

Difference:  $\mu_1 - \mu_2$

*Equal variances are assumed for this analysis.*

### Descriptive Statistics

Sample	N	Mean	StDev	SE Mean
H%	15	3.445	0.346	0.089
H%_1	15	3.337	0.320	0.083

### Estimation for Difference

Difference	Pooled StDev	95% CI for Difference
0.108	0.333	(-0.141, 0.357)

### Test

Null hypothesis  $H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$

Alternative hypothesis  $H_1: \mu_1 - \mu_2 \neq 0$

T-Value	DF	P-Value
0.89	28	0.382

## Two-Sample T-Test and CI: IRT/Af, IRT/Af\_1

### Method

$\mu_1$ : mean of IRT/Af

$\mu_2$ : mean of IRT/Af\_1

Difference:  $\mu_1 - \mu_2$

*Equal variances are assumed for this analysis.*

### Descriptive Statistics

Sample	N	Mean	StDev	SE Mean
IRT/Af	15	5.817	0.528	0.14
IRT/Af_1	15	5.864	0.854	0.22

### Estimation for Difference

Difference	Pooled StDev	95% CI for Difference
-0.047	0.710	(-0.578, 0.484)

### Test

Null hypothesis  $H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$

Alternative hypothesis  $H_1: \mu_1 - \mu_2 \neq 0$

T-Value	DF	P-Value
-0.18	28	0.858

## Two-Sample T-Test and CI: GF, GF\_1

### Method

$\mu_1$ : mean of GF

$\mu_2$ : mean of GF\_1

Difference:  $\mu_1 - \mu_2$

*Equal variances are not assumed for this analysis.*

### Descriptive Statistics

Sample	N	Mean	StDev	SE Mean
GF	15	799.5	76.4	20
GF_1	15	752	150	39

### Estimation for Difference

Difference	95% CI for Difference
47.3	(-43.3, 137.9)

### Test

Null hypothesis  $H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$

Alternative hypothesis  $H_1: \mu_1 - \mu_2 \neq 0$

T-Value	DF	P-Value
1.09	20	0.289



## Two-Sample T-Test and CI: d0,5Pm, d0,5Pm\_1

### Method

$\mu_1$ : mean of d0,5Pm

$\mu_2$ : mean of d0,5Pm\_1

Difference:  $\mu_1 - \mu_2$

*Equal variances are assumed for this analysis.*

### Descriptive Statistics

Sample	N	Mean	StDev	SE Mean
d0,5Pm	15	0.6297	0.0607	0.016
d0,5Pm_1	15	0.5488	0.0899	0.023

### Estimation for Difference

Difference	Pooled StDev	95% CI for Difference
0.0810	0.0767	(0.0236, 0.1383)

### Test

Null hypothesis  $H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$

Alternative hypothesis  $H_1: \mu_1 - \mu_2 \neq 0$

T-Value	DF	P-Value
2.89	28	0.007

## AC16 800 20°C vs AC22 800 20°C

### Two-Sample T-Test and CI: H%, H%\_1 Method

$\mu_1$ : mean of H%

$\mu_2$ : mean of H%\_1

Difference:  $\mu_1 - \mu_2$

*Equal variances are assumed for this analysis.*

### Descriptive Statistics

Sample	N	Mean	StDev	SE Mean
H%	15	3.468	0.338	0.087
H%_1	13	3.327	0.335	0.093

### Estimation for Difference

Difference	Pooled StDev	95% CI for Difference
0.142	0.337	(-0.120, 0.404)

### Test

Null hypothesis  $H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$

Alternative hypothesis  $H_1: \mu_1 - \mu_2 \neq 0$

T-Value	DF	P-Value
1.11	26	0.276

## Two-Sample T-Test and CI: IRT/Af, IRT/Af\_1

### Method

$\mu_1$ : mean of IRT/Af

$\mu_2$ : mean of IRT/Af\_1

Difference:  $\mu_1 - \mu_2$

*Equal variances are not assumed for this analysis.*

### Descriptive Statistics

Sample	N	Mean	StDev	SE Mean
IRT/Af	15	1.493	0.456	0.12
IRT/Af_1	13	1.880	0.188	0.052

### Estimation for Difference

Difference	95% CI for Difference
-0.386	(-0.656, -0.117)

### Test

Null hypothesis  $H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$

Alternative hypothesis  $H_1: \mu_1 - \mu_2 \neq 0$

T-Value	DF	P-Value
-3.00	19	0.007

## Two-Sample T-Test and CI: GF, GF\_1

### Method

$\mu_1$ : mean of GF

$\mu_2$ : mean of GF\_1

Difference:  $\mu_1 - \mu_2$

*Equal variances are not assumed for this analysis.*

### Descriptive Statistics

Sample	N	Mean	StDev	SE Mean
GF	15	333.0	64.8	17
GF_1	13	309.0	31.7	8.8

### Estimation for Difference

	95% CI for
Difference	Difference
23.9	(-15.5, 63.3)

### Test

Null hypothesis  $H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$

Alternative hypothesis  $H_1: \mu_1 - \mu_2 \neq 0$

T-Value	DF	P-Value
1.27	20	0.220

## Two-Sample T-Test and CI: d0,5Pm, d0,5Pm\_1

### Method

$\mu_1$ : mean of d0,5Pm

$\mu_2$ : mean of d0,5Pm\_1

Difference:  $\mu_1 - \mu_2$

*Equal variances are assumed for this analysis.*

### Descriptive Statistics

Sample	N	Mean	StDev	SE Mean
d0,5Pm	15	1.509	0.264	0.068
d0,5Pm_1	13	1.306	0.156	0.043

### Estimation for Difference

Difference	Pooled StDev	95% CI for Difference
0.2031	0.2207	(0.0312, 0.3750)

### Test

Null hypothesis  $H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$

Alternative hypothesis  $H_1: \mu_1 - \mu_2 \neq 0$

T-Value	DF	P-Value
2.43	26	0.022

## Two-Sample T-Test and CI: H%, H%\_1

### Method

$\mu_1$ : mean of H%

$\mu_2$ : mean of H%\_1

Difference:  $\mu_1 - \mu_2$

*Equal variances are not assumed for this analysis.*

### Descriptive Statistics

Sample	N	Mean	StDev	SE Mean
H%	15	4.381	0.616	0.16
H%_1	15	3.441	0.262	0.068

### Estimation for Difference

Difference	95% CI for Difference
0.940	(0.577, 1.303)

### Test

Null hypothesis  $H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$

Alternative hypothesis  $H_1: \mu_1 - \mu_2 \neq 0$

T-Value	DF	P-Value
5.44	18	0.000

## Two-Sample T-Test and CI: IRT/Af, IRT/Af\_1

### Method

$\mu_1$ : mean of IRT/Af

$\mu_2$ : mean of IRT/Af\_1

Difference:  $\mu_1 - \mu_2$

*Equal variances are assumed for this analysis.*

### Descriptive Statistics

Sample	N	Mean	StDev	SE Mean
IRT/Af	15	4.911	0.485	0.13
IRT/Af_1	15	5.008	0.441	0.11

### Estimation for Difference

Difference	Pooled StDev	95% CI for Difference
-0.097	0.463	(-0.443, 0.250)

### Test

Null hypothesis  $H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$

Alternative hypothesis  $H_1: \mu_1 - \mu_2 \neq 0$

T-Value	DF	P-Value
-0.57	28	0.571

## Two-Sample T-Test and CI: GF, GF\_1

### Method

$\mu_1$ : mean of GF

$\mu_2$ : mean of GF\_1

Difference:  $\mu_1 - \mu_2$

*Equal variances are assumed for this analysis.*

### Descriptive Statistics

Sample	N	Mean	StDev	SE Mean
GF	15	757	114	29
GF_1	15	779	131	34

### Estimation for Difference

Difference	Pooled StDev	95% CI for Difference
-21.9	122.9	(-113.9, 70.0)

### Test

Null hypothesis  $H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$

Alternative hypothesis  $H_1: \mu_1 - \mu_2 \neq 0$

T-Value	DF	P-Value
-0.49	28	0.629



## Two-Sample T-Test and CI: d0,5Pm, d0,5Pm\_1

### Method

$\mu_1$ : mean of d0,5Pm

$\mu_2$ : mean of d0,5Pm\_1

Difference:  $\mu_1 - \mu_2$

*Equal variances are assumed for this analysis.*

### Descriptive Statistics

Sample	N	Mean	StDev	SE Mean
d0,5Pm	15	0.5964	0.0692	0.018
d0,5Pm_1	15	0.587	0.104	0.027

### Estimation for Difference

Difference	Pooled StDev	95% CI for Difference
0.0089	0.0882	(-0.0570, 0.0749)

### Test

Null hypothesis  $H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$

Alternative hypothesis  $H_1: \mu_1 - \mu_2 \neq 0$

T-Value	DF	P-Value
0.28	28	0.783

## AC16 1100 20°C vs AC22 1100 20°C

### Two-Sample T-Test and CI: H%, H%\_1 Method

$\mu_1$ : mean of H%

$\mu_2$ : mean of H%\_1

Difference:  $\mu_1 - \mu_2$

*Equal variances are not assumed for this analysis.*

### Descriptive Statistics

Sample	N	Mean	StDev	SE Mean
H%	13	4.495	0.567	0.16
H%_1	16	3.456	0.260	0.065

### Estimation for Difference

Difference	95% CI for Difference
1.039	(0.678, 1.400)

### Test

Null hypothesis  $H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$

Alternative hypothesis  $H_1: \mu_1 - \mu_2 \neq 0$

T-Value	DF	P-Value
6.11	16	0.000

## Two-Sample T-Test and CI: IRT/Af, IRT/Af\_1

### Method

$\mu_1$ : mean of IRT/Af

$\mu_2$ : mean of IRT/Af\_1

Difference:  $\mu_1 - \mu_2$

*Equal variances are assumed for this analysis.*

### Descriptive Statistics

Sample	N	Mean	StDev	SE Mean
IRT/Af	13	1.357	0.245	0.068
IRT/Af_1	16	1.658	0.249	0.062

### Estimation for Difference

Difference	Pooled StDev	95% CI for Difference
-0.3010	0.2472	(-0.4904, -0.1116)

### Test

Null hypothesis  $H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$

Alternative hypothesis  $H_1: \mu_1 - \mu_2 \neq 0$

T-Value	DF	P-Value
-3.26	27	0.003

## Two-Sample T-Test and CI: GF, GF\_1

### Method

$\mu_1$ : mean of GF

$\mu_2$ : mean of GF\_1

Difference:  $\mu_1 - \mu_2$

*Equal variances are not assumed for this analysis.*

### Descriptive Statistics

Sample	N	Mean	StDev	SE Mean
GF	13	348.5	22.4	6.2
GF_1	16	356.1	49.6	12

### Estimation for Difference

	95% CI for
Difference	Difference
	-7.6 (-36.4, 21.2)

### Test

Null hypothesis  $H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$

Alternative hypothesis  $H_1: \mu_1 - \mu_2 \neq 0$

T-Value	DF	P-Value
-0.55	21	0.589

## Two-Sample T-Test and CI: d0,5Pm, d0,5Pm\_1

### Method

$\mu_1$ : mean of d0,5Pm

$\mu_2$ : mean of d0,5Pm\_1

Difference:  $\mu_1 - \mu_2$

*Equal variances are assumed for this analysis.*

### Descriptive Statistics

Sample	N	Mean	StDev	SE Mean
d0,5Pm	13	1.357	0.127	0.035
d0,5Pm_1	16	1.342	0.213	0.053

### Estimation for Difference

Difference	Pooled StDev	95% CI for Difference
0.0144	0.1797	(-0.1233, 0.1521)

### Test

Null hypothesis  $H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$

Alternative hypothesis  $H_1: \mu_1 - \mu_2 \neq 0$

T-Value	DF	P-Value
0.22	27	0.831